



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID TLEMCEM



FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET  
DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Mémoire En vue de l'obtention du Diplôme de Master en GEOLOGIE

Option : **HYDROGEOLOGIE**

Présenté par

**BOURBABA YUCEF**

---

**Apport de la modélisation Pluie-Débit pour la connaissance de la ressource  
en eau superficielle. Application à l'Oued Khemis (NW algérien)**

---

Soutenu le, 14 / 10 / 2015

Devant le jury composé de :

<b>Mr A TABET HELAL</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Tlemcen.</b>
<b>Mme R BOUANANI</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université de Tlemcen</b>
<b>Mme K BABA-HAMED</b>	<b>Co-Encadreur</b>	<b>Université de Tlemcen</b>
<b>Mme F HADJI</b>	<b>Examinatrice</b>	<b>Université de Tlemcen</b>
<b>Mme L MAHI</b>	<b>Examinatrice</b>	<b>Université de Tlemcen</b>

2015-2016

## REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je tiens à remercier le Dieu tout puissant qui m'a donné la force et le courage d'aller jusqu'au bout de ce modeste travail.

Je présente également à cette occasion mes chaleureux remerciements à mes encadreurs Madame **R BOUANANI** et Madame **K BABA-HAMED** pour l'aide honorable et infatigable qu'elles m'ont apporté en acceptant de superviser et de suivre mon travail, pour les conseils et les précieuses orientations.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **A TABET HELAL**, de nous avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance et également mes remerciements à Madame **F HADJI** et Madame **L MAHI** pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **A BOUANANI** pour ses conseils et ses orientations.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignant de la filière géologie.

## **DEDICACE**

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère et mon très cher père qui m'ont toujours soutenue,

A mon frère,

A mes sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

Et toute la promotion: Master 2 Hydrogéologie 2014 /2015.

***Youcef BOURBABA***

## المخلص

لاشك أن هذه الدراسة جاءت لتلقي الضوء على جانب مهم مرتبط بظاهرة بيئية غاية في الأهمية وهي دراسة العلاقة التي تربط بين التساقط والجريان في الأودية خاصة في مجال الاستعمالات المتعلقة بالتهيئة الهيدروليكية والحماية ضد الفيضانات وكذلك في تسيير الموارد المائية ، وبغرض معرفة وفهم أوضح لهيدرولوجيا الحوض المائي قمنا بتطبيق نموذج هذا التساقط وجريان مياه التدفق وهو النموذج الشامل للخران أو نموذج الهندسة الريفية على حوض واد خميس (شمال غرب تافنة-الجزائر)، مستعملين في البداية العلاقات الرياضية البسيطة وبعد أن رأينا عجز تلك العلاقات -ذلك لأنها لا تستعمل كل المعطيات التي تؤثر في ظاهرة الجريان -ارتأينا أن نركز على تطبيق نموذج الهندسة الريفية وبالإضافة إلى عاملي التساقط والتدفق أدخلنا عامل التبخر كأحد المعطيات ملتزمين في ذلك حسابات على المدى السنوي والشهري .

بعد هذا الضبط المتحصل عليه من خلال هذه الدراسة قمنا بإثبات صحة هذه النتائج بهدف تحصيل نموذج فعال تحققنا بعدها إلى نجاعة تلك النتائج التي كانت مرضية إلى حد بعيد .

**الكلمات المفتاحية:** خميس - تافنة - الهيدرولوجيا - نموذج - نموذج GR - ارتباط - ضبط - التحقق

## Résumé

Cette étude est sans doute venue pour mettre en exergue un point très important d'un phénomène naturel particulier, c'est l'étude de la relation entre la retombée de la pluie et le débit d'écoulement dans les oueds, très spécialement l'utilisation dans l'aménagement hydraulique et la protection contre les inondations, mais aussi la gestion des ressources hydriques.

Dans le but d'une meilleure compréhension de l'hydrologie d'un bassin, nous avons appliqué la modélisation pluie-débit, qui est un modèle global à réservoir ou modèle du génie rural (GR) sur le bassin d'Oued Khemis (Tafna-NW Algérien) soumis à un climat semi-aride. Nous avons tenté une modélisation pluie-lame d'eau écoulée par l'approche corrélatoire, toutefois les résultats obtenus n'étaient pas concluants par ce que elles ne prennent pas en considération toutes les données qui affectent le débit. De ce fait, nous avons choisi de procéder à l'application du modèle du génie rural, où, nous avons introduit en plus des facteurs pluie et débit, le facteur de l'évapotranspiration, au pas de temps annuel et mensuel. Les résultats obtenus sont plus satisfaisants avec des coefficients de détermination plus importants.

**Mots clés :** Khemis – Tafna – Hydrologie – Modèle – Modèle GR – Corrélation - Calage – Validation

## **Abstract**

There is no doubt that this work is coming to highlight some sides of an important natural phenomena, it's the studying of the relationship between rainfall and the runoff in the streams, especially their use in the hydraulic arrangement and protection against floods, but also management of the aquatic resources

In the purpose of a better understanding of the hydrological basin, we applied the global model for reservoir or model of rural engineering to modeling rain-flow, which is the basin of Oued Khemis (Tafna - NW Algeria) characterized by semi-arid climat. We tried a rainfall-depth of runoff modeling by correlation approach, however, the results were inconclusive.- they don't take in consideration all factors that may influence the flow-these justify the choice of rural engineering, and in addition to rain fall and runoff we introduced the factor of evapotranspiration, annual and monthly measurements were taken.

At the end we were able to prove the veracity of our results which were very satisfactory and can be considered as a step forward to acquire an efficient model.

**Key words:** Khemis – Tafna – Hydrology – Model – Model GR – Correlation – Timing – Validation

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	01
<b>CHAPITAR I : GENERALITES ET MORPHOMETRIE .....</b>	<b>03</b>
I.1- INTRODUCTION .....	04
I.2- SITUATION GEOGRAPHIQUE .....	04
I.3- CARACTERISTQUES PHYSQUES DU BASSIN VERSANT .....	05
I.3.1- Caractéristique de forme .....	05
I.3.1.1- Indice de compacité (de Gravelius) .....	06
I.3.1.2- Rectangle équivalent .....	06
I.3.2- Etude du réseau hydrographique .....	07
I.3.2.1- Densité de drainage .....	08
I.3.2.2- Rapport de confluence $R_c$ .....	08
I.3.2.3- Rapport de longueur .....	09
I.3.2.4- Coefficient de torrentialité .....	10
I.3.2.5- Temps de concentration des eaux .....	10
I.3.3- Etude du Relief .....	10
I.3.3.1- Etude de la répartition de la surface en fonction de l'altitude .....	10
I.3.3.2- Etude des pentes .....	12
A- Indice de pente de Roche $I_p$ .....	12
B- Indice de pente global $I_g$ .....	12
C- Dénivelée spécifique ( $D_s$ ) .....	13
I.3.4- Profil en long de l'oued Khemis .....	13
I.4- Conclusion .....	14
<b>CHAPITAR II : GEOLOGIE .....</b>	<b>15</b>
II.1- Cadre géologique .....	16
II.2- Série litho-stratigraphique .....	17
II.2.1- Primaire.....	17
II.2.1.1- Silurien .....	18
II.2.1.2- Dévonien .....	18
II.2.1.3- phase éruptive .....	18
II.2.2- Secondaire.....	18
II.2.2.1- Trias .....	18

II.2.2.2- Jurassique inférieur et moyen .....	18
II.2.2.3- Jurassique supérieur.....	20
a. Argiles de Saïda.....	20
b. Grés de Boumediene.....	20
c. Calcaire de Zarifat .....	20
d. Dolomies de Tlemcen .....	20
e. Calcaires de Stah.....	20
f. Marno-calcaires de Raourai .....	20
g. Calcaire de lato et dolomies de terni.....	20
h. Marno-calcaire de Hariga .....	20
II.2.3- Plio-Quaternaire.....	21
II.3- Analyse structurale .....	21
II.3.1- Principales phases tectoniques.....	21
II.3.2- Unités structurales .....	21
II.3.2.1- Accidents décrochant.....	22
a. Décrochement sénestres .....	22
b. Décrochement dextres .....	22
<b>CHAPITAR III : HYDRO-CLIMATOLOGIE .....</b>	<b>23</b>
III.1- Introduction .....	24
III.2- Etude des paramètres climatiques .....	24
III.2.1- Etude des précipitations .....	24
III.2.1.1- Précipitations annuelles .....	24
III.2.1.2- Précipitation mensuelle .....	25
III.2.1.3- Précipitation saisonnière.....	26
III.2.2- Etude des températures.....	26
III.2.2.1- Températures annuelles.....	27
III.2.2.2- Températures moyennes mensuelles .....	27
III.2.3- Evapotranspiration potentielle.....	28
III.2.3.1- Estimation de l'évapotranspiration .....	28
➤ Formule de Turc .....	28
➤ Formule de Thornthwaite .....	29
III.2.4- Etude du climat .....	30
A- Les méthodes graphiques :( Méthode courbes pluvio-thermiques de Bagnouls et Gaussen) .....	30
B- Indices climatiques.....	31



B.1- Indice d'Aridité de De Martonne .....	31
➤ Indice d'aridité annuel .....	31
➤ Indice d'aridité mensuel .....	32
B.2- Indice de Moral(1964) .....	33
B.3- Climagramme d'Emberger .....	34
B.4- Indice de Stewart .....	35
B.5- Indice de continentalité de Kerner .....	35
III.3- Etude hydrologique .....	36
III.3.1- Etude des modules (débits) .....	36
III.3.1.1- Débit annuels.....	36
III.3.1.2- Débit moyennes mensuels .....	37
III.3.2- Etude des lames d'eau écoulées .....	37
III.3.2.1-Lame d'eau écoulée annuelle .....	37
III.3.2.2- Lame d'eau écoulée moyenne mensuelle .....	38
III.4- Etude statistique .....	39
• Test de normalité .....	39
• Test graphique .....	39
• Test analytique .....	39
III.4.1- Ajustement des précipitations annuelles à la station de Khemis.....	40
A- Ajustement par la loi normale .....	40
➤ Test graphique .....	40
➤ Test du $\chi^2$ .....	41
B- Ajustement par la loi log normale .....	41
➤ Test graphique .....	41
➤ Test du $\chi^2$ .....	42
C- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée .....	42
III.4.2- Ajustement des lames d'eau écoulées à la station de Khemis .....	43
A- Ajustement des lames d'eau écoulées annuels à loi log normale .....	43
➤ Test graphique .....	43
➤ Test du $\chi^2$ .....	44
B- Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée .....	44
III.5- Conclusion .....	44
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION PLUIE - DEBIT .....</b>	<b>45</b>
IV.1- Etat de l'Art de la modélisation .....	46

IV.1.1- Introduction .....	46
IV.1.2- Modèles hydrologiques .....	46
❖ La modélisation comme outil de recherche .....	46
❖ La modélisation comme outil de prévision.....	46
❖ La modélisation comme outil d'extrapolation.....	46
IV.1.3- Différentes approches de la modélisation .....	47
A- Modèles stochastiques .....	47
B- Modèles déterministes .....	48
C- Modèles à base physique .....	48
D- Modèles paramétriques .....	48
E- Modèles empiriques.....	48
F- Modèles analytiques .....	48
G- Modèles conceptuels.....	48
H- Modèles globaux.....	49
I- Modèles Spatialisés .....	49
J- Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL) .....	49
VI.1.4- Le Modèle GR.....	50
VI.1.4.1- Objectifs de développement.....	50
VI.1.4.2- Mode de développement .....	50
VI.1.4.3- Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	50
VI.1.4.3.1- Introduction .....	50
VI.1.4.3.2- Description mathématique .....	51
VI.1.4.3.3- Paramètre.....	51
VI.1.4.4- Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	51
VI.1.4.4.1- Introduction .....	51
VI.1.4.4.2- Description mathématique .....	52
• Production .....	52
VI.1.4.4.3- Paramètre.....	53
VI.1.5- Conclusion.....	53
IV.2- Application du Modèles Pluie-Débit dans le bassin d'Oued Khemis .....	54
IV.2.1- Modélisation de la relation pluie-lame d'eau écoulée par corrélation .....	54
• Régression simple .....	54
• Corrélation linéaire .....	54
IV.2.1.1- Corrélation annuelle .....	54

IV.2.1.2- Corrélation mensuelle .....	56
IV.2.2- Applications des modèles.....	57
IV.2.3- Applications d'un modèle global .....	57
IV.2.3.1- Modèle annuel GR1A .....	58
IV.2.3.1.1- Calage du modèle .....	58
IV.2.3.1.2- Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc, et la méthode Thornthwaite .....	58
IV.2.3.1.3- Validation du modèle .....	60
IV.2.3.2- Modèle Mensuel GR2M.....	61
IV.2.3.2.1- Calage du modèle .....	61
IV.2.3.2.2- Résultats du calage du modèle annuel par les méthodes de Turc et Thornthwaite.....	61
IV.2.3.2.3- Validation du modèle .....	64
IV.3- Conclusion .....	65
CONCLUSION GENERALE .....	66
Références Bibliographiques .....	69
Annexes .....	73
Liste des tableaux .....	80
Liste des figures.....	82

# **INTRODUCTION GENERALE**

L'importance de l'eau en tant que support de vie et facteur du développement d'un pays est universellement reconnue. Aussi est il nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible ? (Benslimane.M, 2009).

L'estimation des potentialités de la région ouest en ressources en eau de surface est une vraie préoccupation. Pour cela, un bon nombre de questions peut être soulevé :

- ❖ Quelle sont les méthodes pour quantifier les ressources d'eau en surface ?
- ❖ Comment peut-on exploiter d'une meilleure façon cette ressource ?

Notre travail s'inscrit dans le domaine de la modélisation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle annuelle et mensuelle du bassin versant d'Oued Khemis, affluent de la Tafna. L'objectif principal est d'apprécier le fonctionnement d'un modèle de simulation des débits, celui du Génie Rural (GR1A, GR2M).

Ce travail est organisé en quatre chapitres, successivement :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous entamons des généralités sur la région d'étude où nous présenterons la situation géographique et les caractéristiques physiques du bassin versant d'Oued Khemis.
- ❖ Au deuxième chapitre, sera présentée la géologie de la région étudiée.
- ❖ Le troisième chapitre, traitera l'étude des paramètres climatiques du bassin versant d'Oued Khemis qui seront introduits par la suite dans le modèle.
- ❖ Le quatrième chapitre sera consacré à la recherche de modèles pluie-débit pour les données de l'Oued Khemis où deux approches seont utilisées; l'une par corrélations simples, l'autre par l'application d'un modèle à réservoirs pour les pas de temps annuel et mensuel.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale où, tous les résultats feront l'objet d'une synthèse et de recommandations.

CHAPITRE I  
**GENERALITES ET MORPHOMETRIE**



Le bassin versant de l'oued Khemis fait partie des monts de Tlemcen, c'est un affluent rive gauche de la haute Tafna, il est limité par les coordonnées Lambert suivantes :

$$165 \text{ Km} > x > 138 \text{ Km}$$

$$118 \text{ Km} > y > 88 \text{ Km}$$

L'oued Khemis prend sa source à une altitude 1700 m, aux environs du Djebel Dehar Azouj et coule jusqu'à une altitude de 650m au barrage Beni-Bahdel, administrativement, la région d'étude fait partie de la Wilaya de Tlemcen.

D'une superficie de 350 Km<sup>2</sup> ce bassin est limité :

- Au Nord, par Sidi Medjahed et la plaine de Maghnia,
- Au Sud, par Sidi Djilali et Tenouchfi (1841m),
- A l'Est, par les Djebels El Rhar (1523m), Djebel Herhour et Nif el Ogab (1467m), et Guern Zahra (1292m),
- A l'Ouest, par le Horst de Rhar-Roubane (1014m) et Ras-Asfour (1532m).

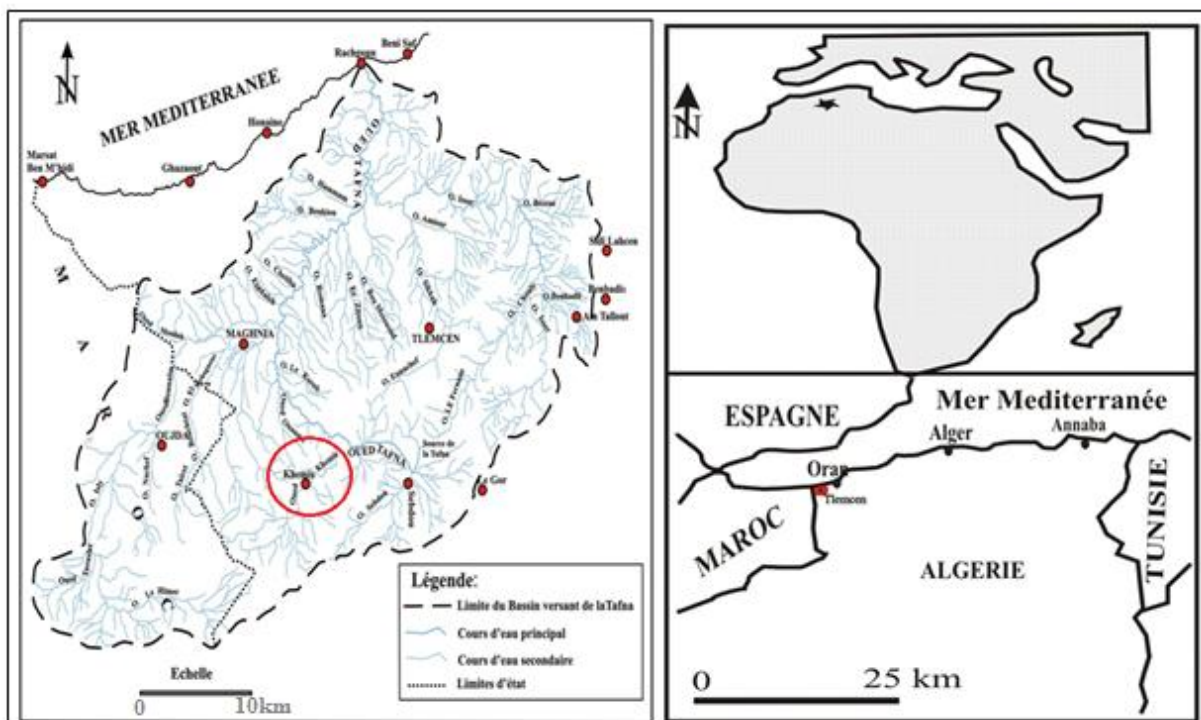


Fig. 2 : Situation du bassin de l'Oued Khemis

### I.3- CARACTERISTIQUES PHYSQUES DU BASSIN VERSANT

#### I.3.1- Caractéristiques de forme

Comme paramètres de mesure :

- Paramètres géométriques : la surface S du bassin et son périmètre P,
- Son indice de forme ou de compacité Kc,
- Les côtés de son rectangle équivalent.



### I.3.1.1- Indice de compacité (de Graveliues)

Le coefficient de Gravelius exprime la forme d'un bassin versant, il est égal au rapport du périmètre du bassin versant considéré à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Plus cet indice sera proche de « 1 » plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court.

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec :

S : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>)      350 Km<sup>2</sup>

P : Périmètre du bassin versant (km)      93 Km

**Kc = 1,39**

La valeur du Kc traduit un allongement du bassin et le développement d'une érosion linéaire.

### I.3.1.2- Rectangle équivalent

C'est une notion introduite pour pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue influence de la forme sur l'écoulement.

On détermine la longueur et la largeur du rectangle qui aurait la même superficie, le même indice, la même courbe de fréquence altimétrique et les mêmes conditions d'écoulement que ceux du bassin versant considéré.

La longueur du rectangle équivalent L (km)

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \quad \mathbf{L = 36,96 \text{ km}}$$

La largeur du rectangle équivalent l (km)

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \quad \mathbf{l = 9,47 \text{ Km}}$$

Dans notre étude la longueur du bassin est de 36,96 Km et la largeur est de 9,47 Km (figure 3)

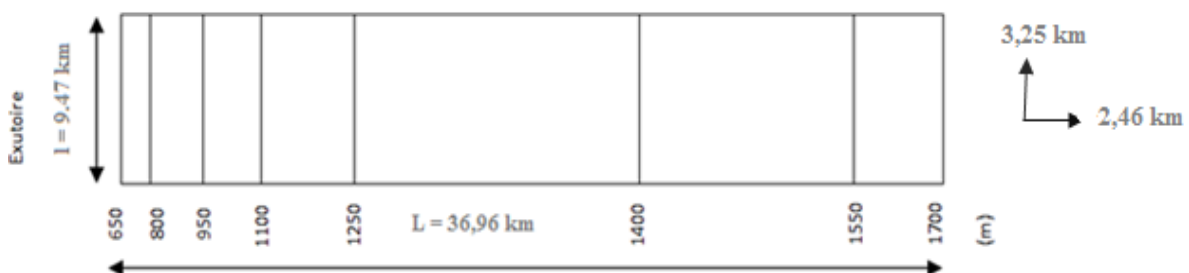


Fig. 3 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued Khemis.

### I.3.2- Etude du réseau hydrographique (figure 4)

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux, qui ont affecté la région au cours des temps géologiques (Seladji.S, 2000).

Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage, les rapports de confluence et rapports des longueurs.

L'oued Khemis est un affluent rive gauche de l'oued Tafna, il court au fond d'une vallée encaissée, cet oued est alimenté essentiellement par des sources qui lui assurent un écoulement permanent.

Il prend naissance à une altitude de 1700m par la rencontre de 3 Oueds :

- Le premier d'Ouled Belkassem.
- Le second renfermant : Oued Tadet, Oued Mazer (même cours d'eau).
- Et le dernier qui renferme : O. Tadert, O.Tirheza, O.Boulefane et O.Chadli (même cours d'eau permanent), un autre cours d'eau celui de O. Laames madhel (temporaire) est lié à ce troisième oued.

L'oued Khemis coule sur une grande partie dans une vallée étroite, au versant abrupt de direction SSW–NNE alimentant le barrage de Beni- Bahdel.

Le schéma du chevelu hydrographique à partir des cartes topographiques à l'échelle 1/50000 de : Rhar-Roubane (carte n°328), Sebdou (carte n°329), Sidi Aissa (carte n°356), Terni (carte n°300)

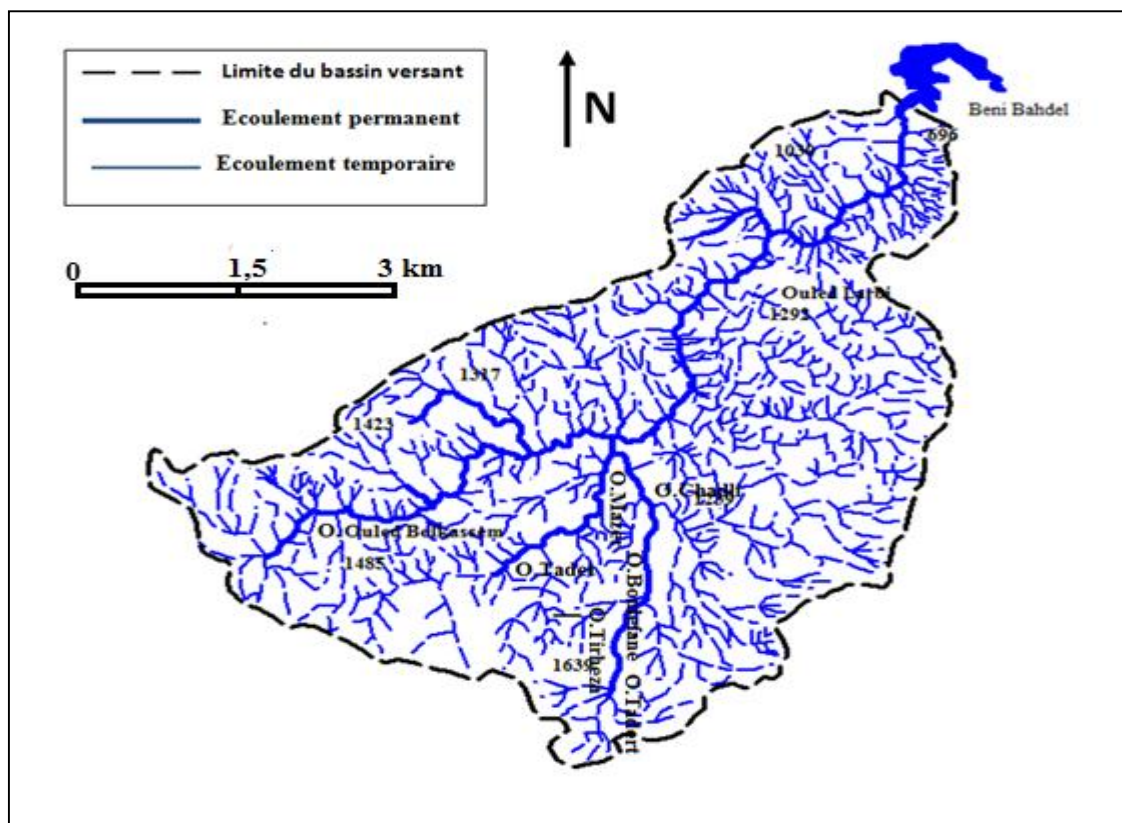


Fig.4 : Réseau hydrographique du bassin versant d'oued Khemis

Nous utiliserons ici la classification définie par STRAHLER et SCHUM, 1954 :

Tout tronçon de cours d'eau formé par la réunion de 2 cours d'eau d'ordre  $x$  est d'ordre  $x+1$ .

Tableau 1: Classification des thalwegs suivant les ordres et rapports caractéristiques

Ordre	Nombre	Rapport de confluence	Longueur [Km]	Longueur moyenne[m]	Rapport des longueurs
1	1905	3,21	571	0,3	/
2	593	6,44	290,5	0,49	1,63
3	92	4,84	152	1,65	3,36
4	19	3,8	54	2,84	1,72
5	05	5	37	7,4	2,61
6	01	/	23,5	23,5	3,18
<b>Total</b>	2615	-	1128	-	-

### I.3.2.1- Densité de drainage

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant, il correspond au rapport de la longueur total des thalwegs par la surface du bassin.

$$D_d = \sum \frac{L_i}{S}$$

Où,

$D_d$  : densité de drainage (km/km<sup>2</sup>)

$L_i$  : longueur moyenne des thalwegs au niveau de chaque ordre (km).

$A$  : Surface du bassin (km<sup>2</sup>)

$$D_d = 3.22 \text{ Km} / \text{Km}^2$$

La valeur élevée de la densité de drainage indique la présence d'une pente forte favorisant des crues rapides, on peut dire que le bassin de Khemis est bien drainé.

### I-3.2.2- Rapport de confluence $R_c$ (figure 5)

C'est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre  $x$  par celui des thalwegs d'ordre supérieur  $x+1$ .

$$\text{Il est défini par : } R_c = \frac{N(x)}{N(x+1)}$$

Il est préférable d'estimer la valeur moyenne des rapports de confluence par méthode graphique, sur un papier semi-log où, on porte

- En ordonnées logarithmique; le nombre de thalwegs
- En abscisse arithmétique l'ordre des thalwegs.

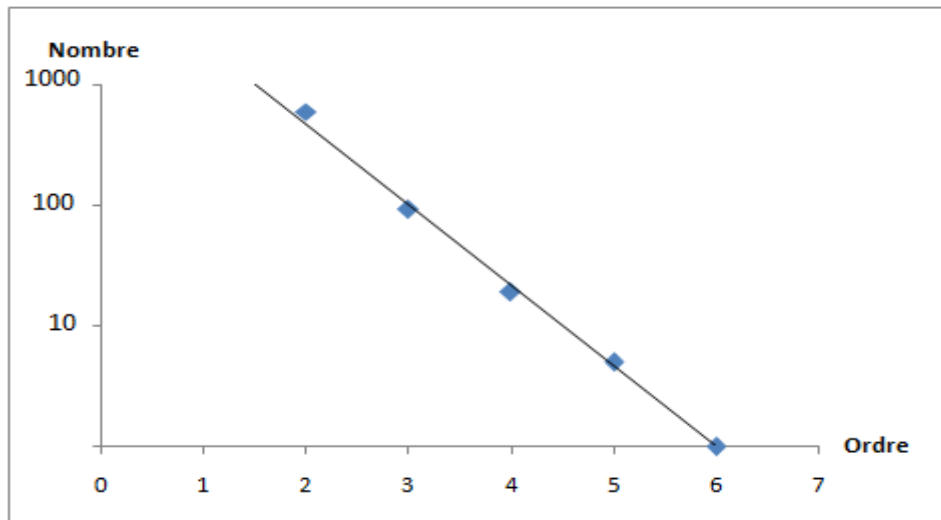


Fig. 5 : Rapport de confluence

On obtient une droite d'équation:  $\log N = ax + b$

$$a = \frac{\log N(x) - \log N(x+1)}{x - (x+1)}$$

Pour le bassin de l'oued Khemis : **Rc = 2,29**

Le réseau est bien organisé, le nombre de cours d'eau d'ordre successifs forme une progression géométrique d'ordre inverse.

### I-3.2.3- Rapport de longueurs (figure 6)

C'est le quotient de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (x+1) par celle des thalwegs d'ordre (x).

$$R_L = \frac{l(x+1)}{l(x)}$$

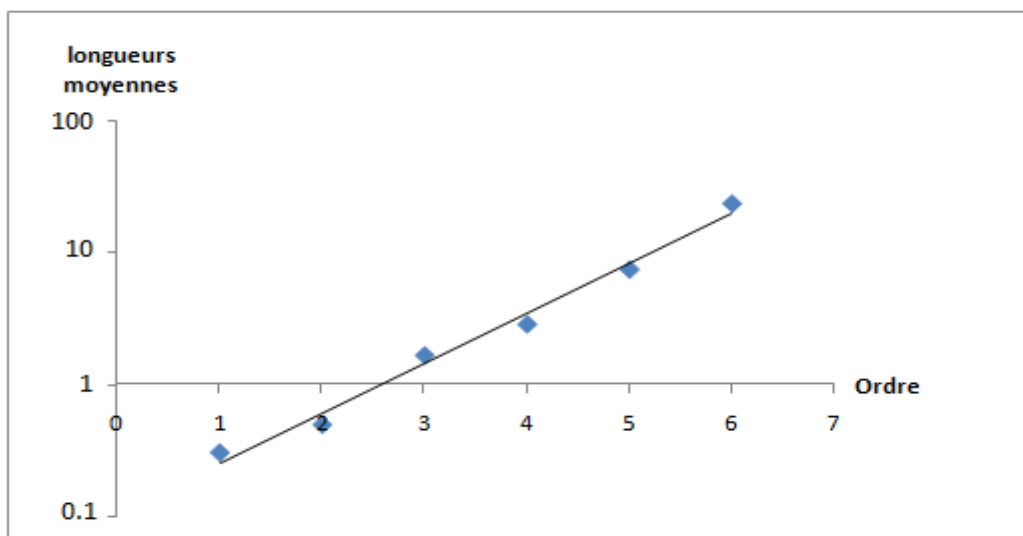


Fig.6 : Rapport des longueurs

Graphiquement nous obtenons une valeur moyenne de  $R_L = 1.38$

La longueur moyenne de thalwegs d'ordres successifs croissants forme une série géométrique directe.

#### I.3.2.4- Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$CT = Dd \cdot Fi$$

Avec :

Dd : densité de drainage

Fi : fréquence des thalwegs élémentaires  $Fi = Ni / S$

Ni : nombre de cours d'eau d'ordre i

$$CT = 17.52$$

#### I.3.2.5- Temps de concentration des eaux

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti

$$Tc = \frac{4\sqrt{S + 1.5L}}{0.8\sqrt{Hmoy - Hmin}}$$

Où,

Tc : temps de concentration (heure)

A : superficie du bassin ( $km^2$ )

L : longueur du thalweg principal (km)

Hmoy : altitude moyenne (m)

Hmin : altitude minimale (m)

$$Tc = 6.61 \text{ heures}$$

### I.3.3- Etude du Relief

Comme paramètres du relief :

- L'indice de pente  $I_p$  de roche,
- L'indice de pente global  $I_g$ .

Qui requièrent la connaissance de la répartition hypsométrique et la dénivelée D.

#### I.3.3.1- Etude de la répartition de la surface en fonction de l'altitude

Après, la mesure de l'aire totale du bassin, on détermine les surfaces partielles (Tableau 2)

Tableau.2: Répartition de la surface en fonction de l'altitude

Tranche d'altitudes (m)	Surface partielle (km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles cumulées (km <sup>2</sup> )	Surface partielle (%)	Surface cumulée (%)	Altitude cumulée (%)
1700-1550	28,3	28,3	8,08	8,08	100
1550-1400	98	126,3	28	36,08	85,74
1400-1250	134	260,3	38,28	74,36	71,45
1250-1100	29,6	289,9	8,45	82,81	57,16
1100-950	26,5	316,4	7,57	90,38	42,87
950-800	25,2	341,6	7,2	97,58	28,58
800-650	8,4	350	2,4	100	14,29

Le tableau 2, Nous permet de tracer la courbe hypsométrique et l'histogramme des fréquences altimétriques.

Pour Strahler, la courbe hypsométrique est le reflet de l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin, dans notre étude la courbe hypsométrique présente une concavité vers le bas, c'est un bassin jeune d'où un potentiel érosif important, il est donc en pleine évolution géomorphologique.

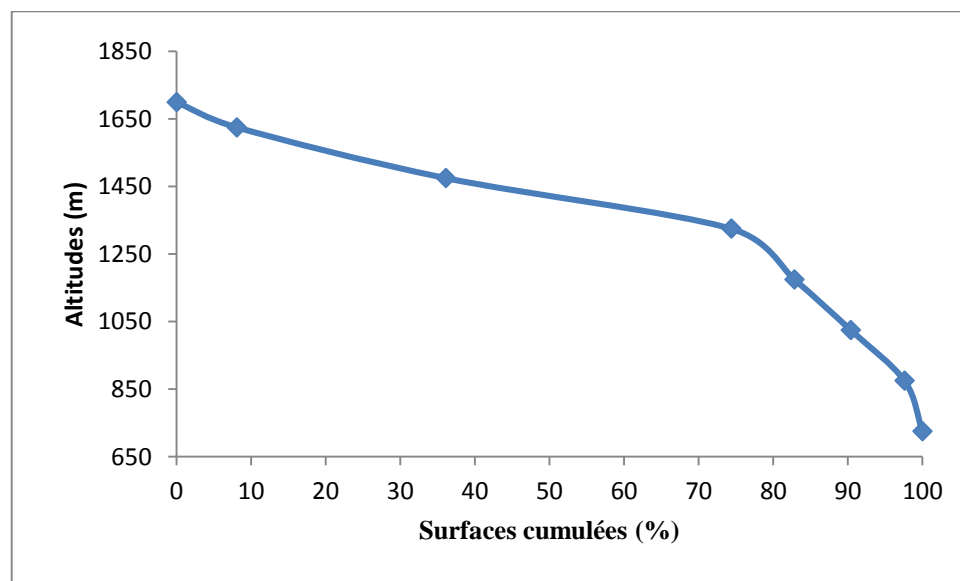


Fig.7: Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Khemis.

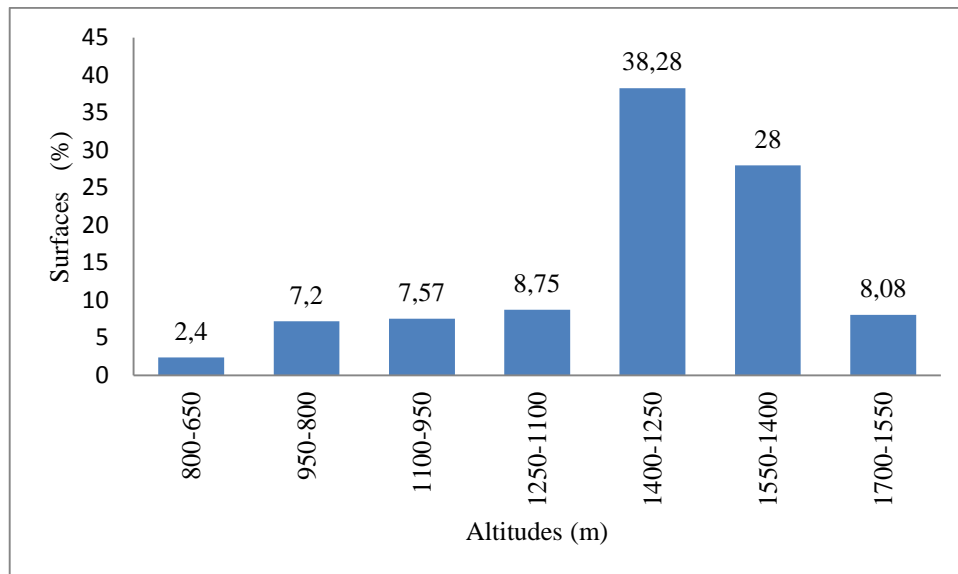


Fig. 8 : Histogramme des fréquences altimétriques du bassin d'Oued Khemis.

La courbe hypsométrique et l'histogramme des fréquences altimétriques du bassin d'Oued Khemis (figure 7 et 8) nous permettent de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

- Altitude la plus fréquente : 1250m-1400m.
- Altitude de fréquence  $\frac{1}{2}$  : 1400m

### I.3.3.2- Etude des pentes

#### A- Indice de pente de Roche $I_p$

C'est un indice de pente qui rend compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique du bassin, nous le déterminons à partir du rectangle équivalent.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n x_i \sqrt{\beta_i (a_i - a_{i+1})}$$

$\beta_i$  : Fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes  $a_i$  et  $a_{i-1}$ ; fonction donnée par le tableau hypsométrique (%).

$x_i$  : Distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent (m).

L: Longueur du rectangle équivalent (m).

$$I_p = 2,89$$

#### B- Indice de pente global $I_g$

La pente joue un rôle capital dans la plus ou moins grande aptitude au ruissellement des terrains, son appréhension peut être faite à l'aide de l'influence de la pente  $I_g$ .

C'est le rapport de la différence des altitudes de fréquences 5% et 95% (D) par la longueur du rectangle équivalent du bassin (L).

$$I_g = \frac{D}{L}$$

D : Dénivelée (m) :  $H_{5\%}-H_{95\%}$  (tirées de la courbe hypsométrique)

L : Longueur du rectangle équivalent (km)

$H_{5\%} = 1627$  m ;  $H_{95\%} = 927$  m ;  $L = 36960$  m

**$I_g = 0,019$**

Tableau 3 : Classification du relief selon l'ORSTOM (in Bouanani A, 2004).

Classe	Type de relief	Indice de pente global
1	Très faible	$I_g < 0,002$
2	Faible	$0,002 < I_g < 0,005$
3	Assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
4	Modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
5	Assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
6	Fort	$0,05 < I_g < 0,5$
7	Très fort	$0,5 < I_g$

D'après la classification d'ORSTOM, on peut dire que le bassin versant de l'Oued Khemis présente un relief Modéré.

### C- Dénivelée spécifique ( $D_s$ )

$$D_s = I_g \sqrt{S}$$

$I_g$  : indice de pente global (m/Km).

S: aire du bassin versant ( $Km^2$ )

**$D_s = 354.3$  m**

Tableau 4: Classification du relief selon  $D_s$ .

Classe	Type de relief	$D_s$
1	Très faible	$D_s < 10m$
2	Faible	$10m < D_s < 25m$
3	Assez faible	$25m < D_s < 50m$
4	Modéré	$50m < D_s < 100m$
5	Assez fort	$100m < D_s < 250m$
6	Fort	$250m < D_s < 500m$
7	Très fort	$500m < D_s$

Les valeurs de  $D_s$  (Tableau. 4), traduisent bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief.

### I.3.4- Profil en long de l'oued Khemis

Le profil en long du cours d'eau principal permet de déterminer les pentes des thalwegs et leur influence sur le régime d'écoulement (figure 9) d'une longueur de 31km, le cours



d'eau principal de l'oued Khemis présente des variations de pente importantes depuis oued Tadert jusqu'à Beni-Bahdel.

Pour le premier tronçon entre oued Tadert et oued Boulefane existe une pente forte de 4.29%, elle diminue pour atteindre 3% entre oued Boulefane et Si Larbi.

La pente s'atténue encore Si Larbi et Khemis où, une rupture de pente de 2.31% est observée et elle passe à 2.14% à Khemis,

Pour le dernier tronçon la pente est faible où elle atteint une valeur de 1.67% à Beni-Bahdel.

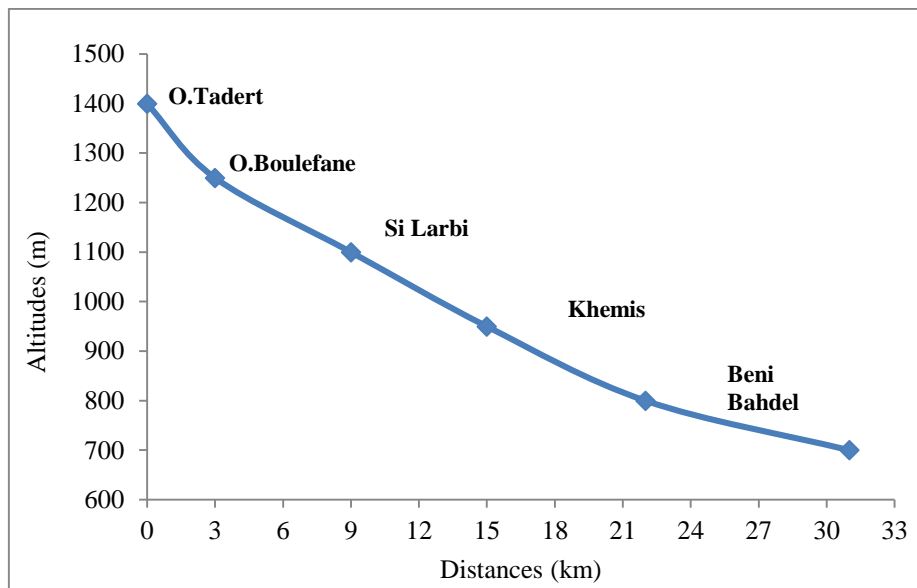


Fig.9 : Profil en long de l'Oued Khemis

#### I.4- Conclusion

Nous représentons sur le tableau 5 les différentes valeurs des caractères physiques du bassin, qui met en évidence le caractère allongé du bassin et un relief généralement fort.

Tableau 5: caractéristiques physio-géographiques du bassin versant de l'oued Khemis

Caractéristique physiographiques	Valeurs
Altitude maximale (m)	1700
Altitude minimale (m)	650
Altitude la plus fréquente (m)	1250 - 1400
Altitude fréquence ½ (m)	1400
Surface (km <sup>2</sup> )	350
Périmètre (km)	93
Longueur (km)	36,96
Largeur (km)	9,47
Indice de Gravelius	1.39
Pente moyenne Ig	0.019

CHAPITRE II  
**GEOLOGIE**

## II.1- Cadre géologique

La structure actuelle de l'Algérie septentrionale est liée aux mouvements hercyniens et alpins.

La région d'étude constitue une zone de passage entre le Tell au Nord et les hautes plaines au Sud. (Figure 10)

- elle se trouve dans un massif montagneux qui forme la terminaison occidentale des monts de Tlemcen et qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud, ce sont les monts de Rhar-Roubane (Mekahli L, 1988).

Les monts de Rhar-Roubane sont bordés par la plaine de Maghnia au Nord, la plaine des Angads d'Oujda et le plateau de Djorf-Ouazazen à l'Ouest, la plaine de Magoura au Sud et en fin la partie occidentale des monts de Tlemcen à l'Est (Mekahli L, 1988).

- Lucas 1942 divise les monts de Rhar-Roubane du Nord vers le Sud en 4 unités géographiques (figure 11)
  - Les monts du Kef.
  - La région de Ras Asfour qui comprend du Nord vers le Sud: le talus des Beni-Bousaid, la barrière et le plateau de Ras-Asfour.
  - La chaîne du Ténouchfi.
  - Le massif de Raourai.

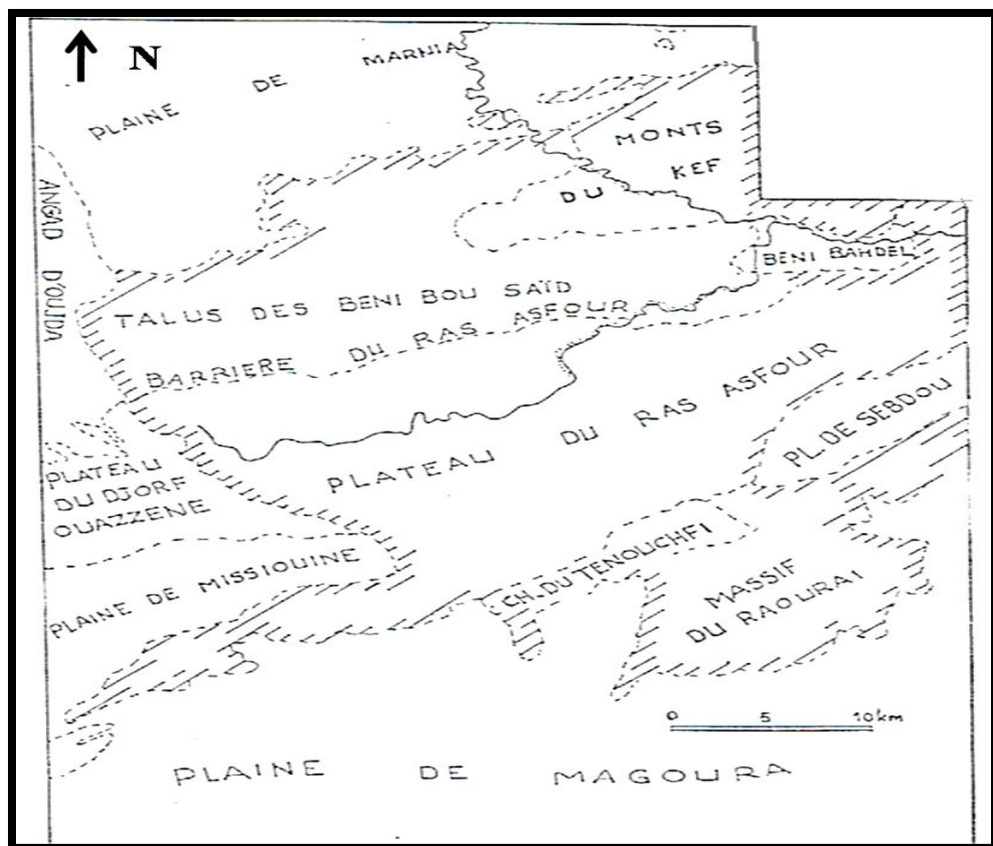


Fig.10 : Unités géographiques des monts de Rhar-Roubane  
(D'après G Lucas, 1942)

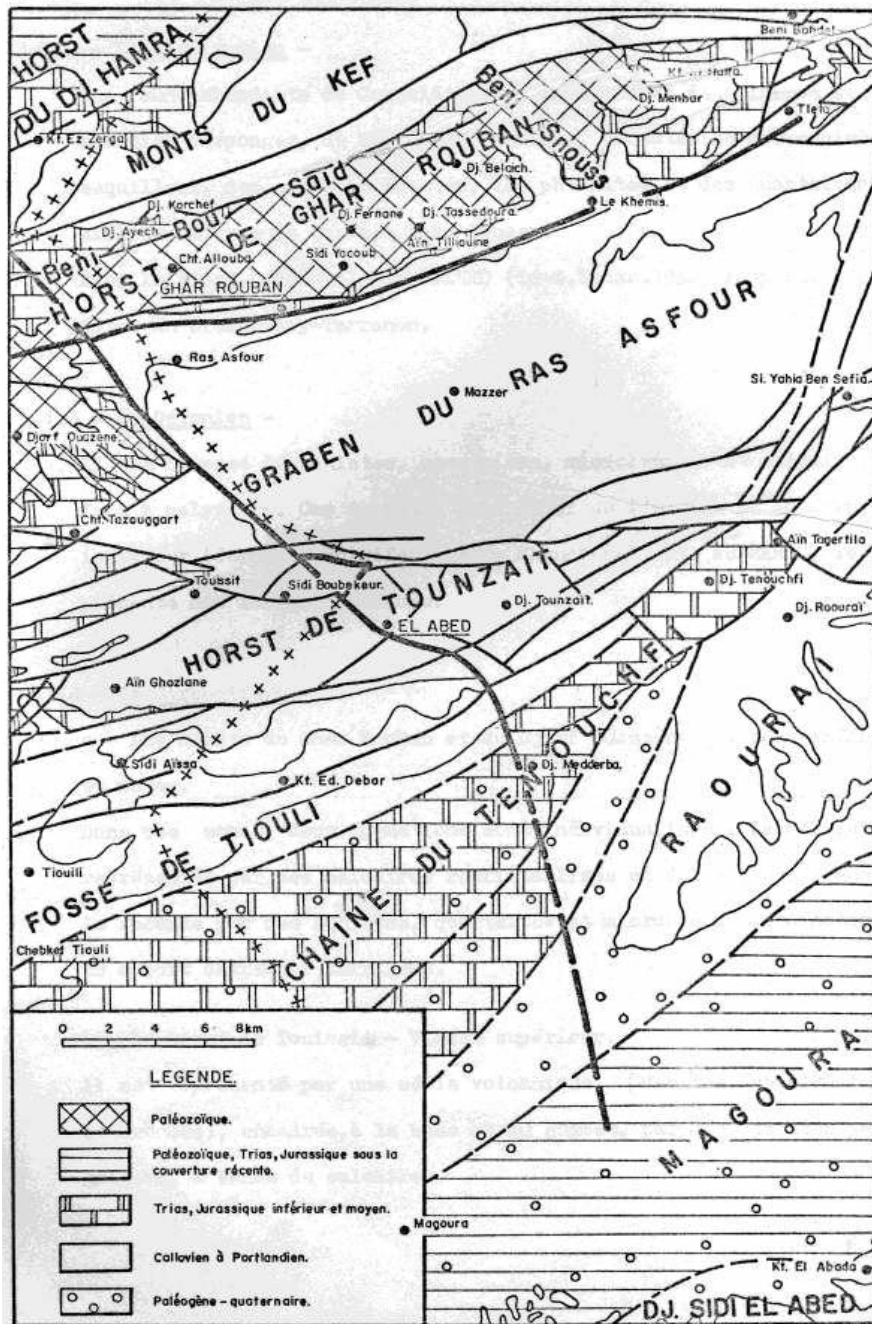


Fig.11: Situation des zones principales de la région de Rhar-Roubane (D'après G.Lucas, 1952)

**II.2- Série litho-stratigraphique:** (figure 12)

La série stratigraphique des monts de Rhar-Roubane est constituée essentiellement de terrains secondaires qui se reposent sur les terrains primaires, Nous avons une prépondérance d'une série épaisse du Jurassique qui va du Lias au Kimméridgien

**II.2.1-Primaire**

Représenté par des formations schisto-quartziques d'âge Silurien et Dévonien qui forment les noyaux des plissements.

### **II.2.1.1- Silurien**

C'est une formation schisteuse reconnue à Djorf Fermane, et Djorf Ouazzen.

### **II.2.1.2- Dévonien**

Il s'agit de d'une formation schisteuse puissante avec des intercalations calcaires et gréseuses.

### **II.2.1.3- Phase éruptive**

Il s'agit de la phase qui donne naissance au granite des Beni-Senous (micro granite de Rhar-Roubane), elle suit les mouvements hercyniens, les roches sont profondément érodées, il se forme de belles plate-formes connues sous le nom de pénéplaines post-hercyniennes sur lesquelles vient de déposer le Trias et le Jurassique. (Gadiri.F, 1995)

## **II.2.2- Secondaire**

### **II.2.2.1- Trias**

Il est localisé essentiellement au Nord de la zone d'étude dans la région de Beni-Bahdel.

Constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques s'accompagnant parfois d'un léger métamorphisme.in Seladji, 2000.

### **II.2.2.2- Jurassique inférieur et moyen**

Les assises du Jurassique inférieur sont discontinues ou lacunaires et n'importe quel niveau peut reposer sur le Primaire. Les premiers niveaux continus appartiennent au Bathonien dans le Horst de Rhar-Roubane (Mekahli L, 1988).

- La série du Jurassique débute par le Lias, le Démorien inférieur affleure dans la partie médiane de Rhar-Roubane au Djorf Tissedoura, il s'agit de formation calcaire (R.Ciszak 1993).
- Au niveau de la frontière Igéro-marocaine, les premiers dépôts liasiques (Carixien-Domerien) indiquent une sédimentation détritique. Ces dépôts sont surmontés par des marno-calcaires et des calcaires à Brachiopodes et spicules, de Spongiaires indiquant l'ouverture de la région vers la mer franche au cours du Toarcien (Mekahli L, 1988).
- Dans la zone de Tenouchfi le Dogger est très épais, le Toarcien et le Jurassique moyen présentent des faciès de vasière relativement profonde (domaine « prétellien » G.Lucas, 1952), le Toarcien est représenté par des couches rouges ou violacées.
- Pendant l'Aalénien et Bajocien se sont déposées des dolomies dans le secteur occidental : Degléne.
- Le Bathonien correspond à des calcaires gris parfois dolomitiques après une lacune du Bathonien supérieur l'enfoncement du milieu se poursuit au début du Callovien avec des argiles gréseuses.

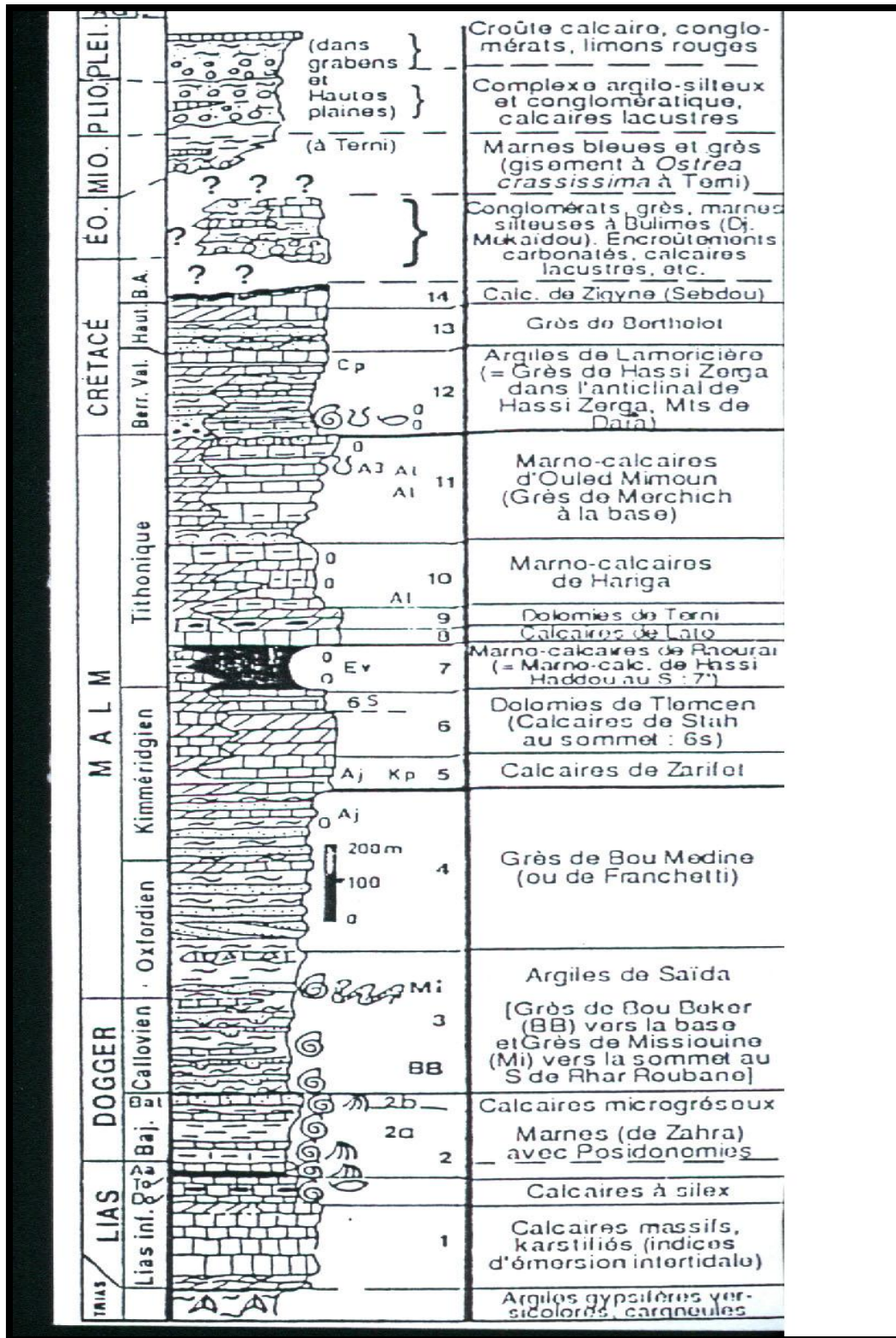


Fig. 12 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah, 1999)

### **II.2.2.3- Jurassique supérieur**

#### **a. Argiles de Saïda**

Elles correspondent à des dépôts argileux et marneux avec des niveaux gréseux à la base, la formation est attribuée au Callovo-Oxfordien.

#### **b. Grès de Boumediene**

Sont constitués essentiellement de grès, avec des passées argileuses pouvant atteindre 500m, on les trouve dans le secteur de Khemis.

#### **c. Calcaire de Zarifat**

Surmontant les grès de Boumediene dans la région du Khemis, a été dégagée par l'oued Otsmane à 600 m en amont d'ouled Arbi (M.Benest, 1985).

Il s'agit d'une alternance de minces lits marneux à rares passées gréseuses légèrement micacées et de calcaires argileux sombres.

Cet ensemble affleure juste au-dessous de la grande falaise dolomitique inférieure de la vallée de Khemis. Ils sont d'âges Kimméridgien.

#### **d. Dolomies de Tlemcen**

Il s'agit des dolomies cristallines grises, cette série est bien exposée sur le versant occidental du Djebel Kossilet, grâce à l'entaille réalisée par l'oued Khemis, on peut admettre qu'elle débute à environ 100 m au-dessus du substratum des calcaires de Zarifat (M.Benest 1985).

#### **e. Calcaires de Stah**

Epais de 29m, cette unité dans laquelle s'intercalent des niveaux marno-calcaires peu compacts débute par des calcaires et s'achève par des dolomies.

#### **f. Marno-calcaires de Raourai**

Du Kimméridgien moyen-Tithonique. Il s'agit de marnes grises, blanchâtres en surface intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs.

Cette formation est limitée au sommet par les calcaires de Lato et dolomies de Terni.

#### **g. Calcaire de lato et dolomies de Terni**

Ils sont du Kimméridgien supérieur (Portlandien). La grande falaise sommitale qui surplombe les gorges de l'oued Khemis en amont du village du même nom, correspond à la deuxième masse dolomitique (G.Lucas 1942), c'est-à-dire à l'ensemble formé par les calcaires de Lato et les dolomies de Terni (M.Benest 1985).

#### **h. Marno-calcaire de Hariga**

Il s'agit d'une alternance de marnes et de marno-calcaires où ils forment les 30 premiers mètres, visible jusqu'au sommet de Djebel Kossilet (M.Benest, 1985).

### II.2.3- Plio-Quaternaire

Représenté par des sédiments continentaux d'âges comparables bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes, on y rencontre les faciès suivants :

- Les travertins : de puissants dépôts de sources disposés en masses et s'avancent en hautes falaises, ils sont jaunes, friables riches en débris végétaux.
- Le complexe de sédiments plio-villafranchiens : la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins encroûtés et remaniés d'épaisseurs très variables mais toujours assez faibles.
- Des marnes rouges avec peu ou pas de galets plus ou moins tufeuses.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers. Nous ne trouvons que de petites terrasses sur les côtés de l'oued Khemis ou les paysans cultivent.
- Les limons, sables et graviers récents : les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres, les galets se trouvent surtout en lits à la base des limons.

### II.3- Analyse structurale : (figure 14)

Les môles primaires résistants de Rhar-Roubane ont largement influencé l'évolution structurale de la région, la direction générale des grandes fractures est WSW-ENE.

#### II.3.1- Principales phases tectoniques

Une étude réalisée par (S.Elmi, 1973), explique les mouvements tectoniques dans la région de Rhar –Roubane.

- a. Les découpages de la région en grands panneaux allongés WSW-ENE par des failles liées aux structures Hercyniennes.
- b. Une phase de serrage donne des plis à grand rayon de courbure.
- c. La compression provoque deux décrochements :
  - Accident NNE : senestre
  - Accident NW-ESE : dextre
- d. Une nouvelle phase de serrage intervient sur un pays modelé par l'érosion.
  - Dans les monts de Rhar-Roubane, elle accuse des différences entre zones stables et secteurs plissés

#### II.3.2- Unités structurales

Les monts de Rhar –Roubane et leur prolongement vers l'Est forment un ensemble de relief grossièrement orienté SW-NE c'est le haut pays oranais (G .B .M. Flamand, 1911) le plus souvent on a des alignements N 70 déviés par des accidents transversaux N 110-140 et N 20.

- Ils représentent la continuité occidentale des monts de Tlemcen où la limite semble être masquée par la transversale de la Tafna (S.Elmi, 1970-1983) qui correspond au pli croiseur de Tenouchfi (G.Lucas, 1952) et qui joue essentiellement en décrochement senestre, le panneau occidental est caractérisé par l'existence du Horst de Rhar-Rouban orient N 70, qui vient se noyer à proximité du barrage de Beni-Bahdel (L.Mekahli 1988).



- On distingue comme grandes unités structurales orientées WSW-ENE :
- L'Anticlinal du Djebel Hamra-Bouhlou.
- Le Synclinal de l'Azaira.
- La zone Anticlinal du Djebel Tmalouft.
- Le Synclinal du Djebel Ouinane.
- Le Horst de Rhar-Roubane (direction WSW-ENE essentiellement de terrains primaires).
- Un Vaste plateau du Ras- Asfour affecté de Failles dans sa partie méridionale.
- La Zone haute de Tenouchfi.

### II.3.2.1- Accidents décrochants

#### a. Décrochement sénestres Nord 10-Nord 30

- Accident du Djebel Tmalouft - Ayech.
- Accident du Ras-Asfour, sur le plateau à l'Ouest de Deglène.
- Accident du Djebel Maroui - Fernane –Tazemmouret.
- Accident de Menchar limitant à l'Est l'extension actuelle du horst de Rhar-Roubane.

#### b. Décrochement dextres Nord 110-Nord 145

- Accident du Djorf Ouazen et Djorf Dourdaz.
- Accident Zouziz – Sidi Djillali.
- Accident Tisse Fsafine – Tazemmouret.
- Accident des Beni-Senus disposition dues à la néotectonique.

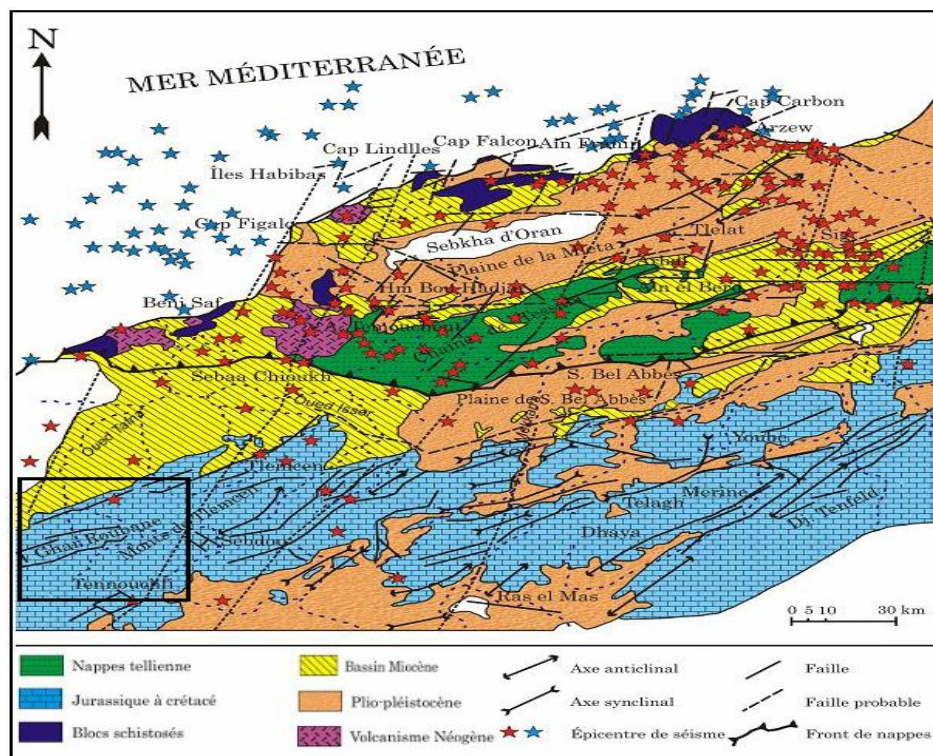


Fig.13 : Carte structurale de l'Oranie nord-occidentale (Thomas, 1985).

CHAPITRE III  
**HYDRO-CLIMATOLOGIE**

### III.1- Introduction

Le climat, par définition est l'ensemble des phénomènes météorologiques (précipitations, Températures, vents ..... ) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution.

Il est déterminé par la situation géographique du lieu (latitude, altitude, éloignement de la mer) et par la circulation atmosphérique.

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans les comportements hydrologiques des cours d'eau. Ces paramètres climatiques (surtout la température et évapotranspiration) sont en relation avec les précipitations.

L'étude hydroclimatique a pour but de :

- ❖ Déterminer le type de climat de la région étudiée.
- ❖ Analyser les paramètres climatiques (température et précipitations) de cette région.

### III.2- Etude des paramètres climatiques

#### III.2.1- Etude des précipitations

Tableau 6 : Présentation de la station pluviométrique

Station	Coordonnées		Altitude (m)	Période d'observation	Précipitations moyennes annuelles (mm)
	Longitude	Latitude			
Khemis	1°34'	34°39'	843	1980-2010	395,3

#### III.2.1.1- Précipitations annuelles

Pour cette étude, nous avons pris en considération les valeurs annuelles des précipitations à la station de Khemis sur la période (1980/1981-2010/2011).

Tableau 7: Précipitations moyennes annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)
1980/1981	515,1	1988/1989	227,5	1996/1997	315,5	2004/2005	259,2
1981/1982	227,5	1989/1990	304,5	1997/1998	327,4	2005/2006	442,0
1982/1983	221,5	1990/1991	460,3	1998/1999	114,4	2006/2007	422,2
1983/1984	295,7	1991/1992	649,1	1999/2000	130,0	2007/2008	225,1
1984/1985	269,8	1992/1993	353,6	2000/2001	476,3	2008/2009	919,9
1985/1986	433,8	1993/1994	381,4	2001/2002	451,3	2009/2010	535,0
1986/1987	488,0	1994/1995	488,9	2002/2003	454,3	2010/2011	393,3
1987/1988	234,3	1995/1996	713,1	2003/2004	524,6	<b>moy</b>	<b>395,3</b>

Nous désignons selon le tableau 7 et la figure 14 :

La moyenne interannuelle des précipitations de la période citée qui est de 395,3mm.

Le maximum est enregistré en 2008/2009 avec 919,9mm, par contre le minimum est observé en 1998/1999 avec 114,4mm

15 années sur 31 ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne annuelle.

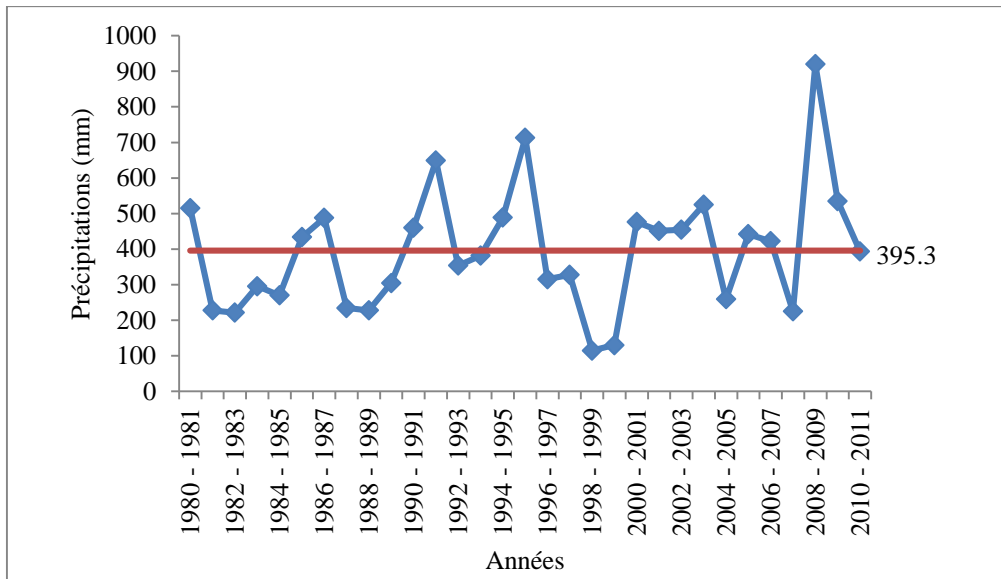


Fig. 14 : Variation des précipitations annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Le coefficient d'irrégularité est :  $\frac{P_M}{P_m} = \frac{919,9}{114,4} = 8,04$ , c'est donc une zone où les précipitations sont distribuées irrégulièrement d'une année à une autre.

**III.2.1.2- Précipitations mensuelles**

La répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations conditionnent en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et par là même le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. Sa connaissance est donc fort utile dans l'optique de notre étude.

Tableau 8 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy
P(mm)	20,1	29,9	41,0	49,7	57,3	49,9	54,7	43,2	32,1	9,7	3,3	4,4	395,3

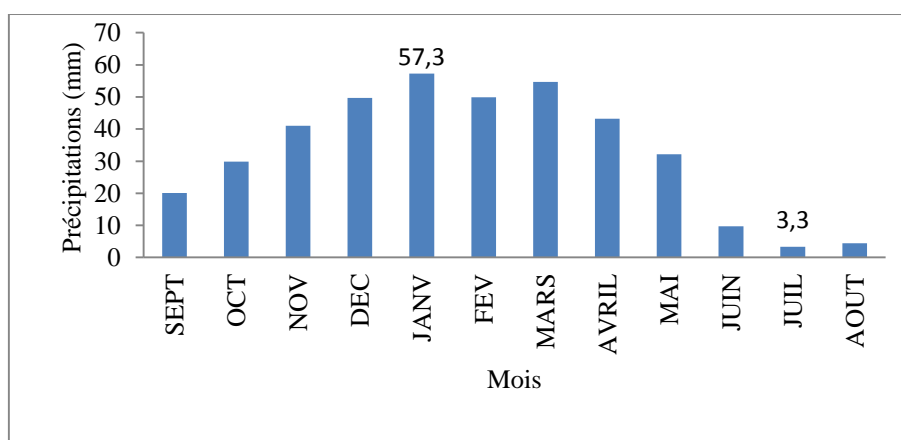


Fig.15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

D'après l'histogramme des précipitations mensuelles à la station des Khemis (figure 15) Montre que le mois le plus pluvieux est celui de Janvier avec 57,3mm. Tandis que le mois de Juillet est le plus sec avec 3.3mm.

### III.2.1.3- Précipitations saisonnières

Les 4 saisons de l'année correspondent à:

- ❖ Hiver : (Décembre, Janvier, Février)
- ❖ Printemps : (Mars, Avril, Mai)
- ❖ Eté : (Juin, Juillet, Août)
- ❖ Automne : (Septembre, Octobre, Novembre)

Tableau 9 : Précipitations saisonnières moyennes à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P(mm)	91	156.9	130	17.4

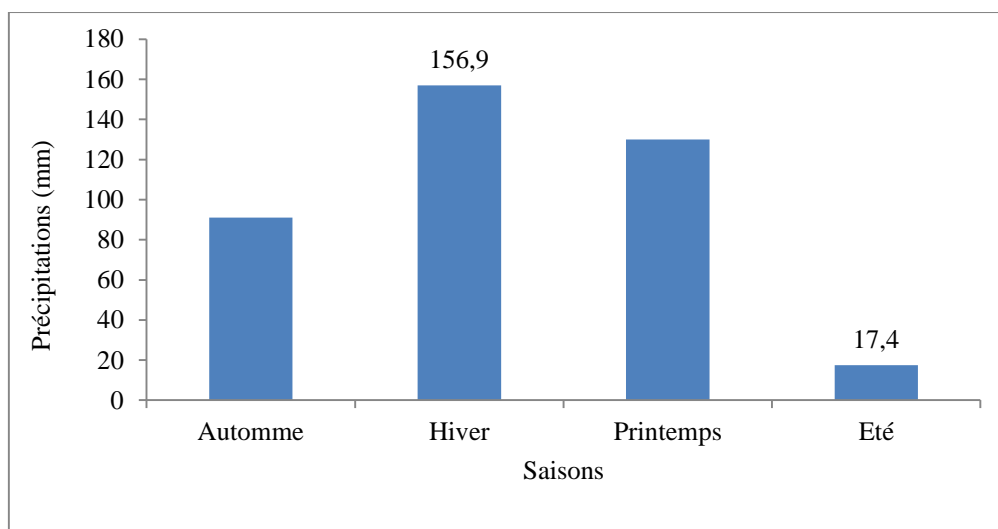


Fig.16 : Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

La distribution des précipitations saisonnières (figure 16), montre que l'Hiver est la saison la plus humide suivie du Printemps. L'Eté est la saison la plus sèche.

### III.2.2- Etude des températures

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. Elle permet avec les précipitations le calcul du déficit d'écoulement et des indices climatiques.

Faute de données à la station de Khemis, nous avons utilisé les températures annuelles et mensuelles de la station de Beni Bahdel sur la période (1986/1987-2005/2006).

### III.2.2.1- Températures annuelles

Tableau 10 : Températures moyennes annuelles à la station Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Année	T °(C)	Année	T °(C)	Année	T °(C)	Année	T °(C)	
1986-1987	17,5	1991-1992	16,9	1996-1997	17,2	2001-2002	18,7	
1987-1988	17,9	1992-1993	16,3	1997-1998	17,7	2002-2003	18,1	
1988-1989	17,4	1993-1994	16,2	1998-1999	17,5	2003-2004	18,4	
1989-1990	18,7	1994-1995	17,4	1999-2000	18,1	2004-2005	18	
1990-1991	17,7	1995-1996	17,5	2000-2001	18,2	2005-2006	17,6	
							<b>Moy</b>	<b>17,6</b>

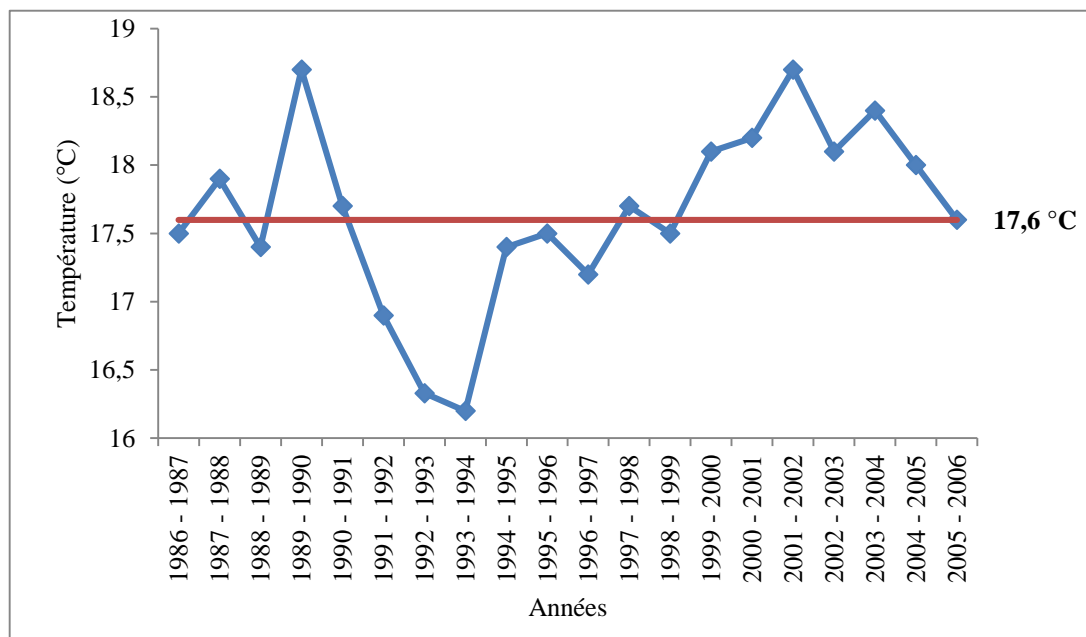


Fig.17 : Variation des températures annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

La moyenne interannuelle des températures est de 17,6 °C, il existe une faible variation de la température durant la période (1986/1987-2005/2006).

### III.2.2.2- Températures moyennes mensuelles

Tableau 11 : Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Année
<b>T (°C)</b>	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8	17,6
<b>T max (°C)</b>	35,4	29,7	23,7	19,3	17,4	19	23,7	26,5	31,3	36,4	40,6	41,2	29,45
<b>T min (°C)</b>	11,2	7,9	2,9	1,9	1,2	1,8	2,5	3,7	6,2	11,3	14,2	14,5	5,83

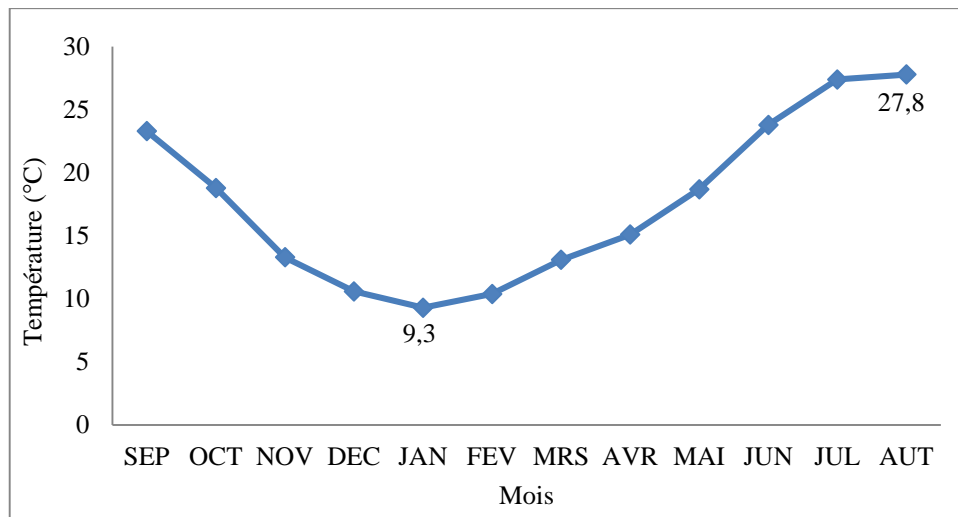


Fig.18 : Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

La figure 18 Montre que les mois d’Août et de Juillet sont les plus chauds avec environ 27.5°C et le mois de Janvier par contre est le plus froid (9.3°C).

### III.2.3- Evapotranspiration potentielle

C’est la quantité d’eau susceptible d’être évaporée par une surface d’eau libre ou par un couvert végétal dont l’alimentation en eau n’est pas le facteur limitant. La valeur de l’évapotranspiration potentielle est fonction de l’énergie disponible. (Margat, 1997)

Elle est estimée par une mesure par un évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que celles de Penman, 1968, Morton, 1983.

#### III.2.3.1- Estimation de l'évapotranspiration

Plusieurs formules permettent d’évaluer l’ETP à partir de différentes mesures climatologiques. Dans notre cas, nous avons utilisé les formules de Turc et Thornothwaite.

##### ➤ Formule de Turc

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l’air et de la radiation globale ou de la durée d’insolation. Cette formule est la suivante:

$$E_{tp} = 0,4 (I_g + 50) k \frac{T}{T+15}$$

Avec:

E<sub>tp</sub> : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm d'eau),

T : Température moyenne mensuelle de l'air (°C),

I<sub>g</sub> : Radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (calorie/cm<sup>2</sup>/jour),

K : Coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats);

$$\text{Si non } K = 1 + \frac{50 - \text{hr}}{70}$$

Si la radiation globale  $I_g$  n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation  $h$  par la formule

$$I_g = I_g A \left( 0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right)$$

Avec:

$I_g A$  : Radiation globale théorique (calorie/cm<sup>2</sup> /jour);

$H$  : Durée théorique des jours du mois.

Pour le calcul de l'ETP par la méthode de Turc on a utilisé le programme élaboré par (L Benadda, 2000).

Tableau 12 : Valeur l'ETP par la méthode de Turc à la station Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	
1986-1987	973,26	1991-1992	952,87	1996-1997	966,65	2001-2002	1002,58	
1987-1988	983,45	1992-1993	940,72	1997-1998	979,94	2002-2003	990,73	
1988-1989	970,32	1993-1994	939,00	1998-1999	971,74	2003-2004	994,88	
1989-1990	1001,30	1994-1995	967,07	1999-2000	985,93	2004-2005	982,10	
1990-1991	975,41	1995-1996	973,07	2000-2001	990,67	2005-2006	972,49	
							<b>Moy (mm)</b>	<b>975,71</b>

#### ➤ Formule de Thornthwaite

Thornthwaite, en 1948 est le premier à introduire le concept d'évapotranspiration potentielle, il a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$ETP = 1,6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \times k \text{ et}$$

$$I = \sum_1^{12} i \text{ avec } i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = \frac{1,6I}{100} - 0,5$$

Avec:

$T$  : Température moyenne mensuelle du mois considéré (C°),

$ETP$  : Evapotranspiration potentielle du mois considéré (mm),

$K$  : Coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude et de la durée du jour.

Tableau 13 : Valeur l'ETP par la méthode de Thornthwaite à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	Année	ETP (mm)	
1986-1987	906,32	1991-1992	904,38	1996-1997	868,76	2001-2002	956,75	
1987-1988	919,3	1992-1993	850,26	1997-1998	879,04	2002-2003	909,27	
1988-1989	893,15	1993-1994	853,28	1998-1999	903,41	2003-2004	965,76	
1989-1990	954,25	1994-1995	923,6	1999-2000	942,96	2004-2005	929,8	
1990-1991	912,03	1995-1996	887,49	2000-2001	936,84	2005-2006	940,76	
							<b>Moy</b>	<b>911,87</b>



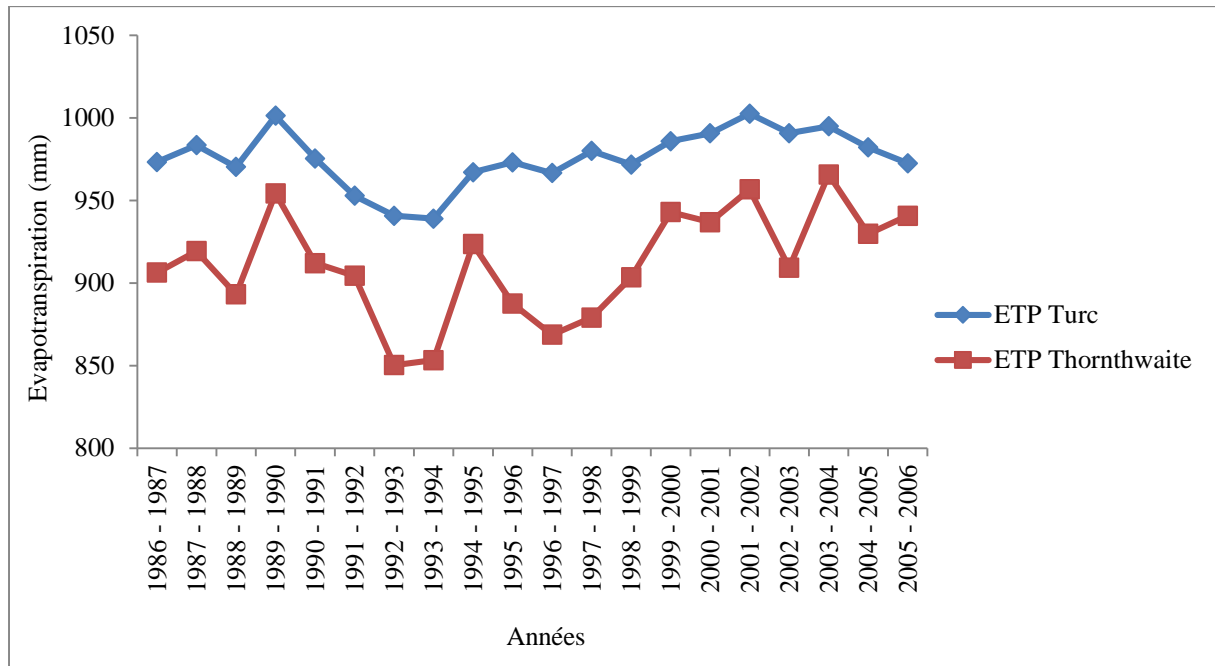


Fig. 19 : Variation de l'ETP Turc et l'ETP Thornthwaite pour la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).

Les courbes de la figure 19, montrent que les valeurs annuelles de l'ETP de Turc sont supérieures à celles de l'ETP de Thornthwaite.

### III.2.4- Etude du climat

Pour l'étude du climat, nous disposons de différentes méthodes:

- les premières, nous permettent de visualiser l'étendue des périodes sèches et humides.
- Les secondes sont basées sur le calcul d'indices permettant à partir des précipitations et températures de caractériser le climat dominant la région.

#### A- Les méthodes graphiques: (courbe pluvio-thermique de Bagnouls et Gausson)

Pour Gausson et Bagnouls, un mois sec est celui où, le total moyen des précipitations exprimées en mm est inférieur ou égal au double de la température moyenne exprimée en degrés Celsius ( $P < 2T$ )

Cette relation permet d'établir des diagrammes pluviothermiques sur lesquels les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations.

- La courbe des températures passe au-dessus de celles des précipitations pendant les mois secs alors que pour les mois humides, la courbe des précipitations passe au-dessus de la courbe des températures.

Les valeurs des précipitations et températures mensuelles sont reportées dans le tableau 14,

Tableau 14: Valeurs des précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Khemis (1986/1987-2005/2006).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Année
P (mm)	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5	389,8
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8	17,6

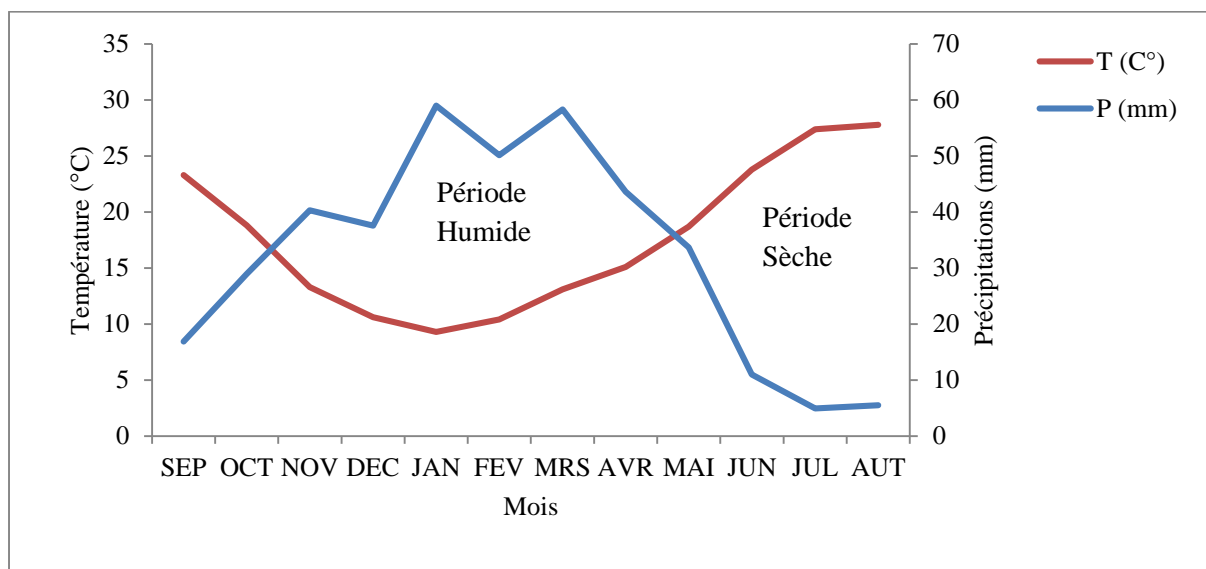


Fig. 20 : Diagramme pluviothermique à la station de Khemis

- Une période humide entre le mois de Novembre et mois de Mai.
- Une période sèche occupant les autres mois de l'année.

### B- Indices climatiques

L'utilisation des indices climatique définis par les différents auteurs est très intéressante, car elle permet de mieux visualiser le type de climat d'une région.

#### B.1- Indice d'Aridité de De Martonne

De Martonne a imaginé en 1923 un indice d'aridité dont les variations correspondaient aux changements des conditions d'écoulement de l'eau.

##### ➤ Indice d'aridité annuel

En 1923, De Martonne a défini l'indice d'Aridité comme ceci :

$$I = P / (T + 10)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

T : Températures moyennes annuelles (°C)

Tableau 15: Indice d'aridité annuel de De Martonne à la station de Khemis

P (mm)	389,8
T (°C)	17,6
I	14,12

De Martonne propose la classification suivante :

- $20 < I$  : Climat humide
- $10 < I < 20$  : Climat semi-aride
- $5 < I < 10$  : Climat désertique
- $I < 5$  : Climat hyper aride

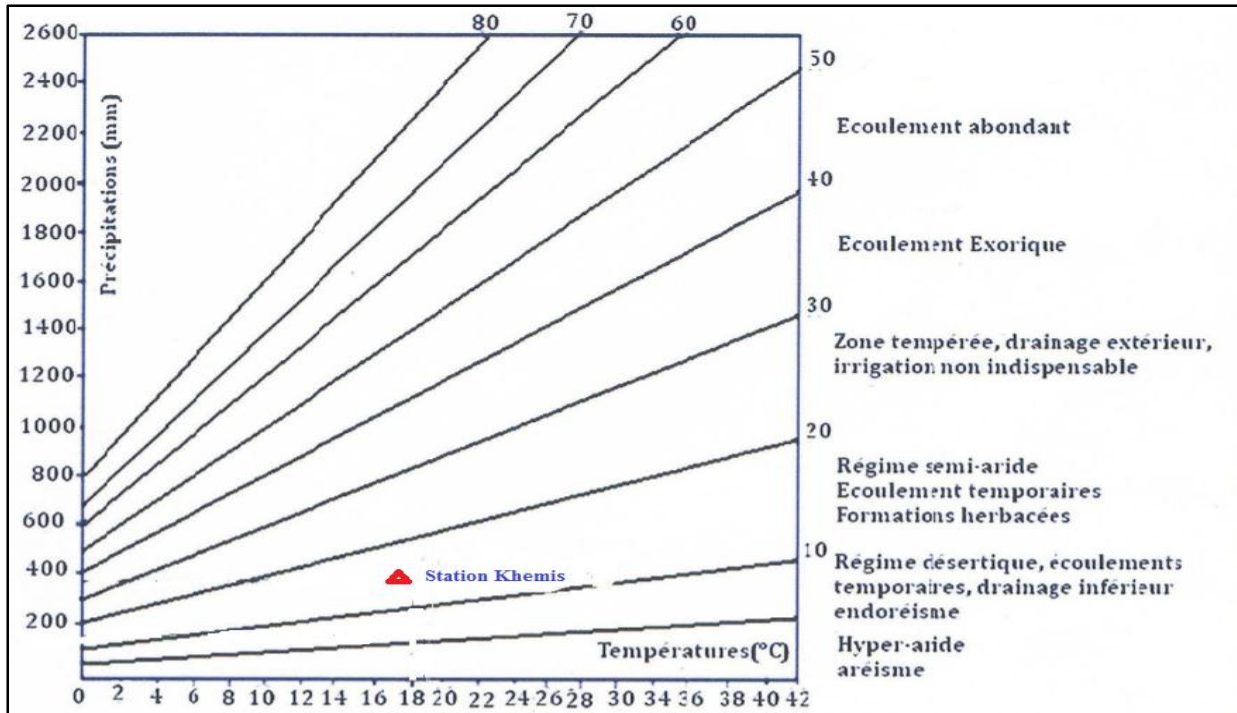


Fig. 21 : Abaque de De Martonne.

Le calcul donne une valeur comprise entre 10 et 20 et le report sur l’abaque (figure 21) caractérise cette région par un climat semi-aride avec des écoulements temporaires.

➤ **Indice d’aridité mensuel**

Utilisé par les élèves de De Martonne dans le but de préciser les conditions de la semi-aridité. Cet indice est donné par la relation suivante :

$$I = 12p / (T + 10)$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Température moyenne mensuelle (°C)

Les résultats sont représentés dans le tableau

Tableau 16 : valeurs des indices d’aridité mensuels de De Martonne à la station de Khemis.

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P (mm)	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5
T (°C)	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8
I	6.09	12.04	20.75	21.9	36.68	29.53	30.28	20.84	14.09	3.9	1.57	1.75

On peut alors définir :

- les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars et avril comme étant des mois humides.
- Les mois Mai, et Octobre comme climat semi-aride.
- Celui de Septembre comme désertique.
- Et enfin les mois de Juin, Juillet et Août comme hyperaride.

### B.2- Indice de Moral (1964)

L'Indice pluviométrique annuel est donné par :

$$I = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Avec

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyenne annuelles (°C)

Tableau 17 : Indice de moral à la station de Khemis

<b>P (mm)</b>	389.8
<b>T (C°)</b>	17.6
<b>I<sub>a</sub></b>	1.17

Moral a proposé un indice mensuel donné par la formule suivante :

$$I_m = \frac{P}{0,1t^2 - t + 20}$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : Température moyenne mensuelle (°C)

Tableau 18 : Valeurs des indices mensuels de Moral à la station de Khemis

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
<b>P(mm)</b>	16,9	28,9	40,3	37,6	59	50,2	58,3	43,6	33,7	11	4,9	5,5
<b>T (°C)</b>	23,3	18,8	13,3	10,6	9,3	10,4	13,1	15,1	18,7	23,8	27,4	27,8
<b>I<sub>m</sub></b>	0,33	0,79	1,65	1,82	3,05	2,46	2,42	1,57	0,93	0,21	0,07	0,09

Les quatre types de mois de l'indice de Moral :

- mois pluvieux:  $p > 0,1T^2 - T + 30$
- mois humide :  $0,1T^2 - T + 30 > p > 0,1T^2 - T + 20$
- mois sec:  $0,1T^2 - T + 20 > p > 0,05T^2 - T + 10$
- mois aride:  $p < 0,05T^2 - T + 10$

Tableau 19: Type de climat selon Moral

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
<b><math>0,1t_m^2 + t_m + 30</math></b>	60,98	46,5	34,4	30,6	29,3	30,4	34,1	37,7	46,3	62,8	77,7	79,5
<b><math>0,1t_m^2 + t_m + 20</math></b>	50,98	36,5	24,4	20,6	19,3	20,4	24,1	27,7	36,3	52,8	67,7	69,5
<b><math>0,05t_m^2 - t_m + 10</math></b>	13,8	8,9	5,5	5,01	5,02	5,01	5,5	6,3	8,8	14,5	20,1	20,8
<b>Type</b>	S	S	P	P	P	P	P	P	S	A	A	A

S : Sec, P : Pluvieux, A : Aride

Nous pouvons remarquer que selon l'indice de Moral, la station de Khemis est caractérisée par 6 mois pluvieux, 3 mois Secs et 3 mois aride.

### B.3- Climagramme d'Emberger

La méthode basée sur les limites des aires occupées par les différentes associations végétales, consiste à reporter sur un climagramme établie par L Emberger, en ordonnée la valeur de  $Q_2$  et en abscisse la moyenne des minima du mois le plus froid en °C.

Avec :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{M+m}{2}(M-m)} \times 1000 \quad \text{Où,} \quad Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

M : moyenne des maxima de la température en (°K) du mois le plus chaud,

m : moyenne des minima de la température en (°K) du mois le plus froid,

$Q_2$  : quotient pluviométrique d'Emberger.

$$M = 41.2 + 273 = 314.2^\circ\text{K}$$

$$m = 1.2 + 273 = 274.2^\circ\text{K}$$

Tableau 20 : Indice d'Emberger de la station de Khemis

P (mm)	389.8
M (°K)	314.2
m (°K)	274.2
$Q_2$	33.12

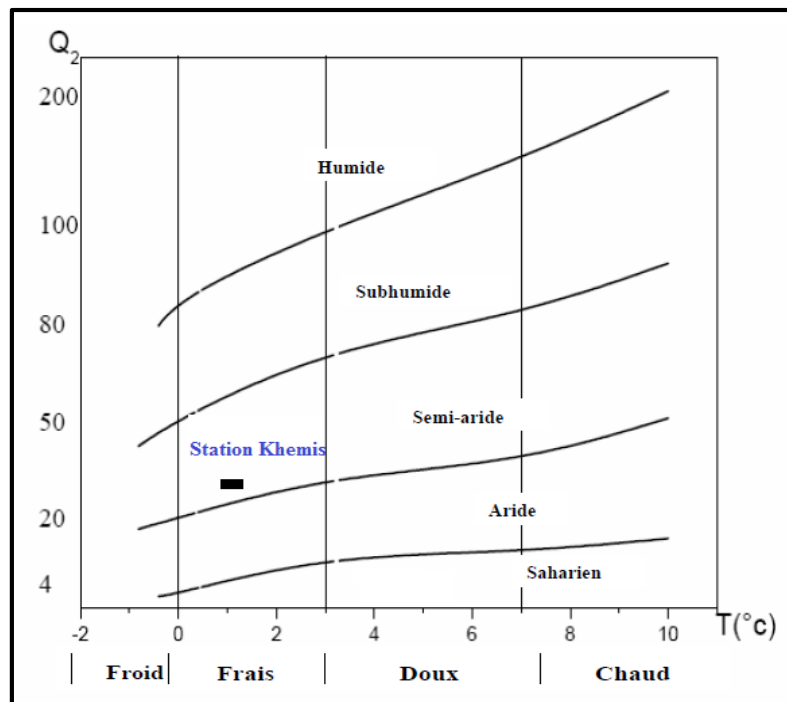


Fig.22: Climagramme d'Emberger.

En reportant cette valeur sur le climagramme d'Emberger qui comporte en ordonnées les valeurs de  $Q_2$  et en abscisses la moyenne des minima du mois le plus froid ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Nous constatons que la région présente un climat semi-aride avec un hiver frais.

#### B.4- Indice de Stewart

Cet indice est donné par la relation suivante :

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M - m}$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des maxima de température du mois le plus chaud en ( $^{\circ}\text{C}$ )

m : moyenne des minima de température de mois le plus froid en ( $^{\circ}\text{C}$ )

- $10 < Q_2 < 50$  Climat semi-aride
- $2 < Q_2 < 10$  Climat désertique
- $Q_2 < 2$  Climat insaturé

Tableau 21 : indice de Stewart de la station de Khemis

P (mm)	389.8
M ( $^{\circ}\text{K}$ )	314.2
m ( $^{\circ}\text{K}$ )	274.2
$Q_2$	33.42

L'indice de Stewart ( $Q_2$ ) est compris entre 10 et 50, donc cette valeur caractérise un climat semi-aride.

#### B.5- Indice de continentalité de Kerner

Cet indice permet de préciser l'influence de la mer sur les conditions locales, Kerner a donné la relation suivante :

$$IK = \frac{T_0 - T_A}{A} \times 100$$

$T_0$  : température moyenne du mois d'octobre ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_A$  : température moyenne du mois d'avril ( $^{\circ}\text{C}$ )

A : amplitude entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tableau 22 : Indice de Kerner de la station de Khemis

$T_0$	18.8
$T_A$	15.1
A	18.5
$I_K$	20

Comparant la valeur obtenue ( $I_k = 20$ ) avec les résultats de la station côtière de Béni-Saf ( $I_k = 34,7$ ) et celle très continentale de Ghardaïa ( $I_k = 1,3$ ), Nous constatons que notre région subie des influences maritimes (climat méditerranéen).

### III.3- Etude hydrologique

#### III.3.1- Etude des modules (débits)

##### III.3.1.1- Débit annuels

Tableau 23 : Débit annuels à la station hydrologique de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Années	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Années	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Années	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Années	Débit (m <sup>3</sup> /s)
1980 - 1981	1,34	1988 - 1989	0,41	1996 - 1997	0,14	2004 - 2005	0,09
1981 - 1982	0,37	1989 - 1990	0,35	1997 - 1998	0,17	2005 - 2006	0,11
1982 - 1983	0,35	1990 - 1991	1,14	1998 - 1999	0,50	2006 - 2007	0,18
1983 - 1984	0,35	1991 - 1992	0,79	1999 - 2000	0,13	2007 - 2008	0,06
1984 - 1985	0,46	1992 - 1993	0,27	2000 - 2001	0,42	2008 - 2009	1,89
1985 - 1986	0,83	1993 - 1994	0,39	2001 - 2002	0,44	2009 - 2010	0,27
1986 - 1987	1,01	1994 - 1995	0,80	2002 - 2003	0,71	2010 - 2011	0,12
1987 - 1988	0,42	1995 - 1996	0,78	2003 - 2004	0,43	<b>Moy</b>	<b>0,51</b>

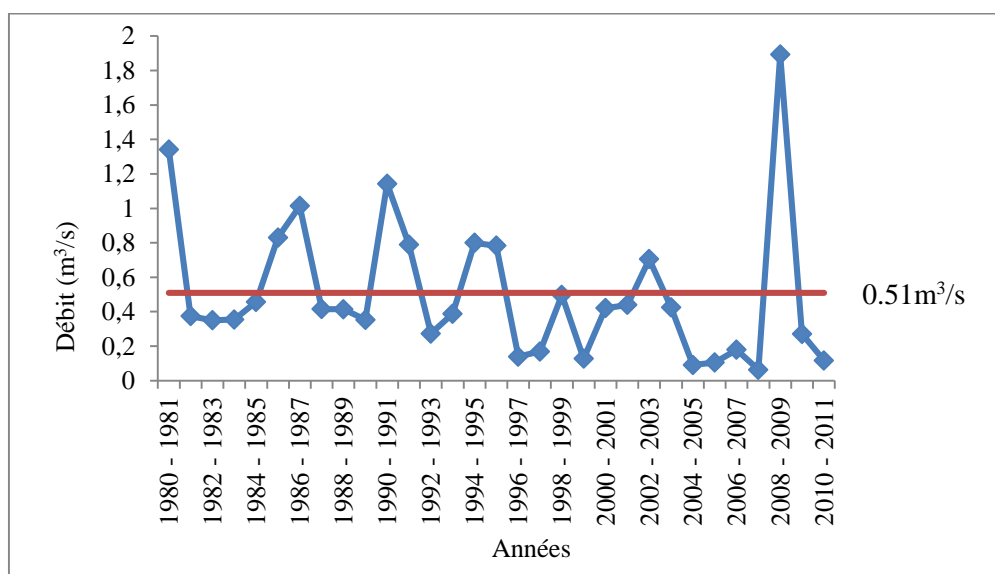


Fig. 23 : Variation des débits annuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).

La courbe de la variation des débits annuels à la station de Khemis montre que la moyenne interannuelle des débits est de  $0,51 \text{ m}^3/\text{s}$ , le maximum est enregistrée en 2008 - 2009 avec  $1,89 \text{ m}^3/\text{s}$  par contre, le minimum est enregistré en 2007-2008 il n'est que de  $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### III.3.1.2- Débit moyens mensuels

Tableau 24 : Débit moyens mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy
Débit (m <sup>3</sup> /s)	0,15	0,22	0,37	0,54	0,86	1,01	1,60	0,57	0,38	0,19	0,11	0,10	<b>0,51</b>

L'histogramme des débits moyens mensuels à la station de Khemis (figure 24), montre que le mois à grand débit est le mois de Mars avec 1.6 m<sup>3</sup>/s et le mois à faible débit est celui d'août avec 0.1 m<sup>3</sup>/s.

Nous observons sur l'histogramme des débits moyens mensuels, une augmentation des modules à partir du mois de Septembre jusqu'au mois de Mars, cela correspond à la période de fortes précipitations. Ensuite, une nette diminution des débits marque les autres mois à cause de la diminution des précipitations.

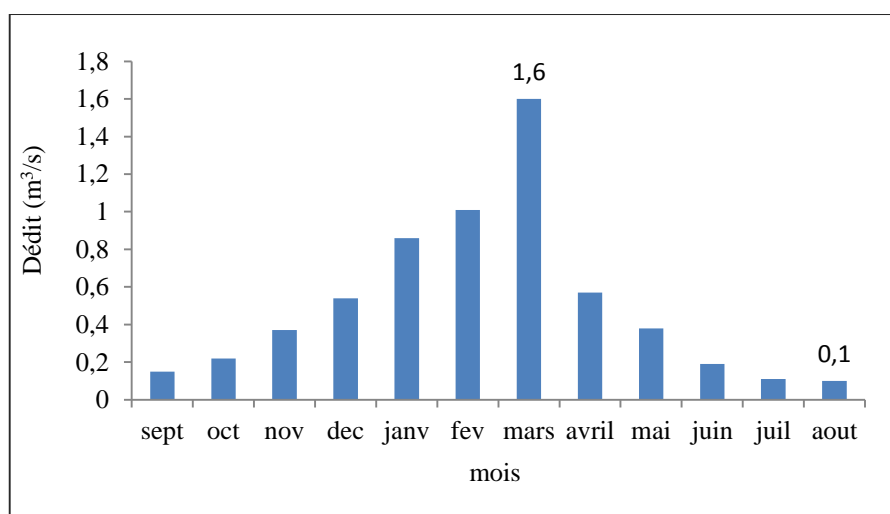


Fig.24 : Histogramme des débits mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).

### III.3.2- Etude des lames d'eau écoulées

Pour cette étude, nous avons pris en considération les valeurs annuelles et mensuelles des lames d'eau écoulées de la station de Khemis, d'où la lame d'eau écoulée est calculée de puis le débit, et le débit d'après les résultats de l'ANRH.

#### III.3.2.1- Lame d'eau écoulée annuelle

Tableau 25 : lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)	Années	Lame d'eau (mm)
1980/ 1981	119,16	1988/ 1989	36,78	1996/ 1997	12,38	2004/ 2005	8,1
1981/ 1982	33,24	1989/ 1990	31,35	1997/ 1998	14,99	2005/ 2006	9,37
1982/ 1983	31,08	1990/ 1991	101,51	1998/ 1999	44,13	2006/ 2007	15,87
1983/ 1984	32,52	1991/ 1992	70,19	1999/ 2000	11,32	2007/ 2008	5,57
1984/ 1985	40,59	1992/ 1993	24,28	2000/ 2001	37,35	2008/ 2009	168,17
1985/ 1986	73,8	1993/ 1994	34,47	2001/ 2002	39,04	2009/ 2010	24,06
1986/ 1987	90,08	1994/ 1995	71,06	2002/ 2003	62,67	2010/ 2011	10,36
1987/ 1988	36,89	1995/ 1996	69,62	2003/ 2004	37,8	<b>Moy</b>	<b>45,09</b>



D'après la figure 25, la variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis montre que la moyenne interannuelle des lames d'eau écoulées est de 45,09mm, le maximum est enregistré en 2008 - 2009 avec 168,17mm et le minimum est enregistré en 2007-2008 avec 5,57mm. En effet cette lame d'eau maximale correspond exactement aux précipitations tombées au courant de cette année représentant elles aussi le maximum de la période.

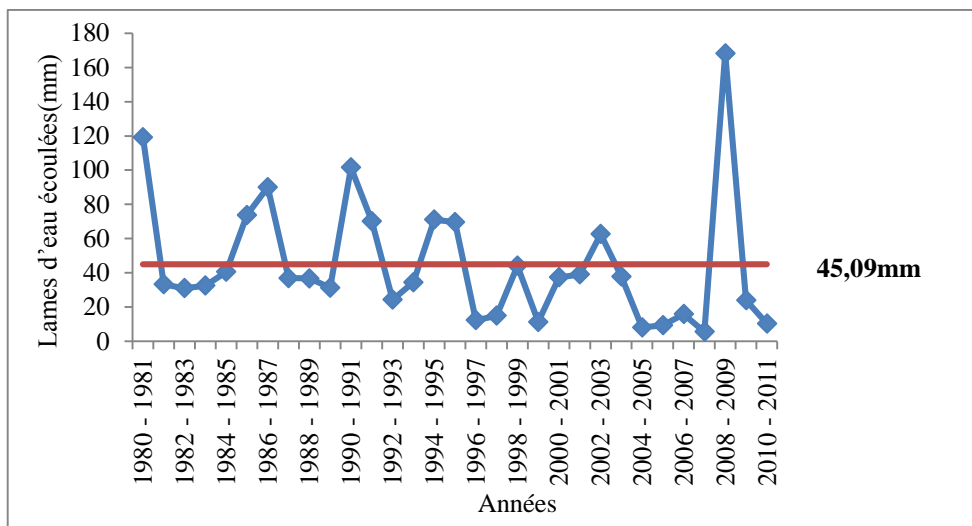


Fig.25 : Variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

**III.3.2.2- Lame d'eau écoulée moyenne mensuelle**

Tableau 26 : lames d'eau écoulées moyennes mensuelle à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	Moy
Lame d'eau (mm)	1,08	1,62	2,74	3,98	6,36	7,48	11,86	4,22	2,78	1,42	0,83	0,72	45,09

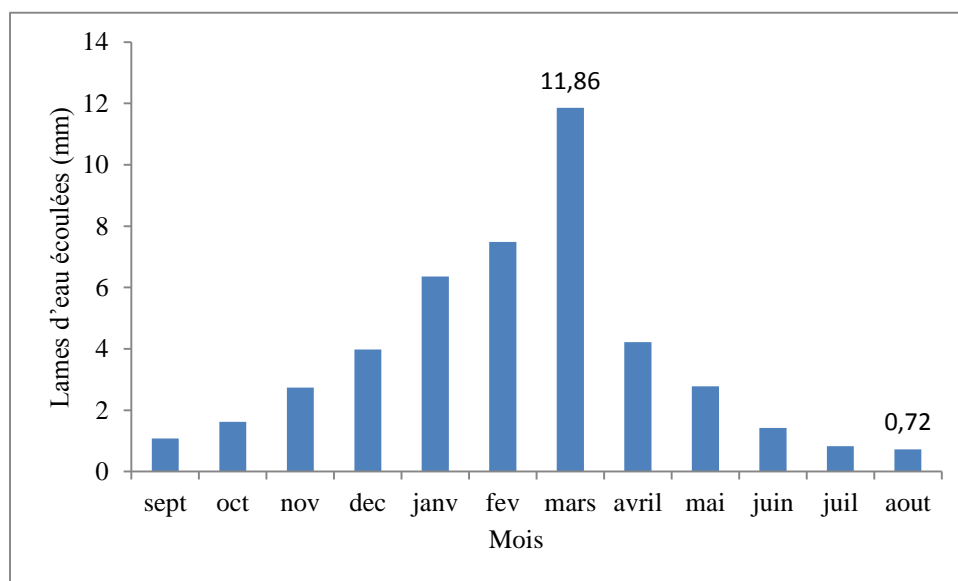


Fig.26 : Histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis

L'histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis (figure 26) Montre que le mois à grand débit est le mois de Mars avec 11,86mm, contre un débit plus faible accusé par le mois d'Août avec 0.72mm.

### III.4- Etude statistique

L'ajustement statistique consiste à vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut dire qu'il est bien ajusté. L'objet de la méthode statistique est la réduction de la masse de données, qui si importante, devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse (Dadi, 1998 in Boukhari, 2004).

Afin de découvrir la structure des variations des débits et des précipitations annuels et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique a été réalisé grâce au logiciel Statistica 8. Ce dernier propose les ajustements statistiques et détermine le modèle d'une loi ou plus qui ajustent au mieux l'ensemble des données. La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

L'ajustement graphique permet de vérifier si la forme de la loi retenue, ayant une valeur de test la plus petite, corrèle bien avec la distribution de la variable étudiée et représentent mieux l'échantillon. Le calcul des différents paramètres de la loi ou les lois choisies permet enfin de déduire les variations futures de la variable pour une probabilité donnée (R.Bouanani ,2010)

- **Test de normalité**

Pour tester la normalité des séries, il existe deux méthodes :

- **Test graphique**

Consiste à tracer sur un papier de Gauss la courbe théorique et la courbe empirique et de les comparer.

- **Test analytique**

Parmi les tests utilisés nous avons le test du  $\chi^2$ , le test de Kolmogorov, et nous pouvons aussi utiliser un test qui considère les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Le test de  $\chi^2$  mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du  $\chi^2$ . Il est utilisé pour déterminer si une distribution théorique comme la distribution normale, peut ajuster une distribution empirique, c'est-à-dire une distribution calculée à partir des données observées.

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus adéquate pour notre série pluviométrique annuelle. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale. Pour notre cas, nous allons appliquer les tests graphiques et le test du  $\chi^2$  sur les données de notre bassin versant.

### III.4.1- Ajustement des précipitations annuelles à la station de Khemis

Tableau 27 : Paramètres de position des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_i$	395,3
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (P_i - \bar{P})^2$	29546,6
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	171.89
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0.43

Le coefficient de variation  $Cv < 0,5$ , laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi normale ou une loi log normale.

Le test du  $\chi^2$  permettra de vérifier cette adéquation.

#### A- Ajustement par la loi normale

$$P = \bar{P} + \sigma u$$

##### ➤ Test graphique

L'ajustement graphique des séries pluviométriques à la station Khemis (figure 25), montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss

La fréquence de chaque valeur sera calculée par la relation suivante :

$$F_i = i / N + 1$$

Avec :

i : Rang

N : Période d'observation (nombres d'années)

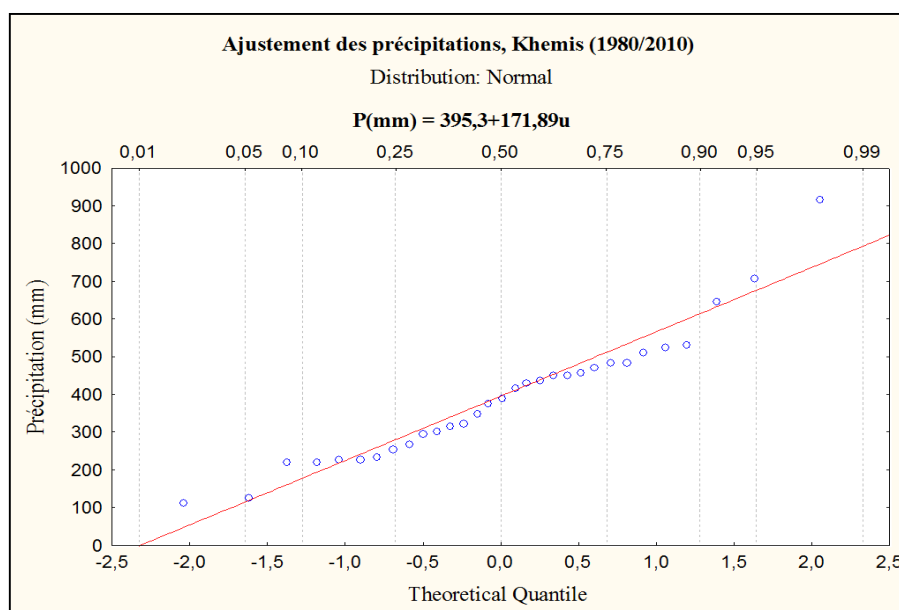


Fig.27 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale.

➤ **Test du  $\chi^2$**

Afin de déterminer la valeur du  $\chi^2$ , nous avons repris les séries des précipitations et nous avons réparti ces valeurs en classes. Les résultats sont donnés au tableau qui suit :

Tableau 28 : Calcul du  $\chi^2$ .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulées à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) <sup>2</sup> /npi
1	<248.6	<-0.85	0.1977	0.1977	7	6.1287	0.124
2	[248.6-382.9 [	[-0.85 ; -0.07 [	0.4721	0.2744	8	8.5064	0.03
3	[382.9-517.2 [	[-0.07 ; 0.71 [	0.7611	0.289	11	8.959	0.465
4	[517.2-651.4 [	[0.71 ; 1.49 [	0.93189	0.17079	3	5.29449	0.994
5	[651.4-785.6 [	[1.49 ; 2.27 [	0.9884	0.05651	1	1.75181	0.323
6	>785.6	>2.27	1	0.0116	1	0.3596	1.14
<b>Total</b>				1	31	$\chi^2_{\text{calculé}}$	3.076

Le nombre de degré de liberté = nombre de classe – nombre de paramètre - 1

$$\text{ddL} = n - m - 1 \quad m = 2$$

$$\text{ddL} = 6 - 2 - 1 = 3 \quad \text{et pour une probabilité de } 0.05$$

$$\chi^2_{\text{tabulé}} = 7.815$$

Le  $\chi^2_{\text{calculé}}$  étant inférieur au  $\chi^2_{\text{tabulé}}$  ( $\chi^2_{\text{calculé}} < \chi^2_{\text{tabulé}}$ ), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution normale des précipitations.

**B- Ajustement par la loi log normale**

$$\text{Log } P = \bar{P} \text{Log} + \sigma \text{Log } U$$

La variable statistique dans ce cas n'exprime pas les précipitations, mais leurs logarithmes.

➤ **Test graphique**

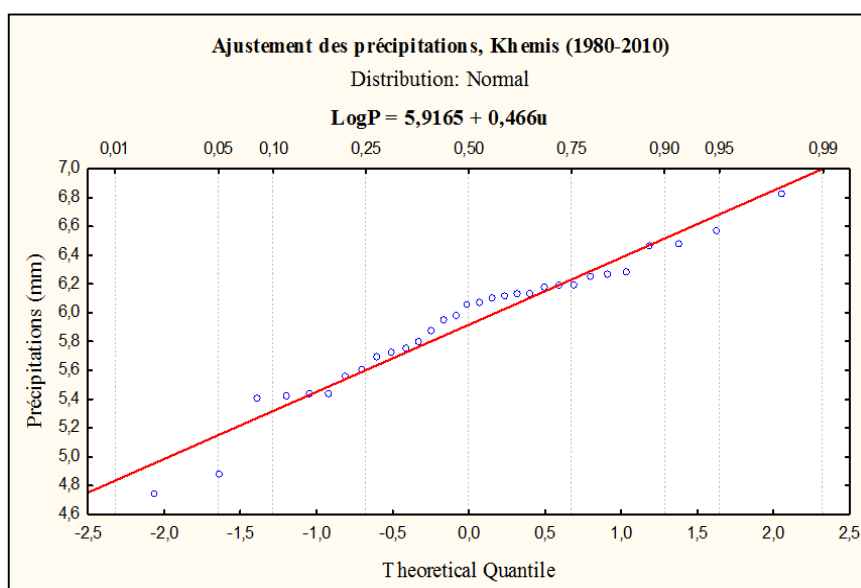


Fig.28 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi log normale.

Tableau 29 : Paramètres de position pour la loi log normale des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\bar{P} \log = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \log P_i$	5.9
Variance	$\sigma^2 \log = \frac{1}{N} \sum (\log P_i - \bar{P} \log)^2$	0.215
Ecart type	$\sigma \log = \sqrt{\sigma^2 \log}$	0.46
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma \log}{\bar{P} \log}$	0.07

➤ Test du  $\chi^2$ :

Tableau 30 : Calcul du  $\chi^2$ .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquence cumulée à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) <sup>2</sup> /npi
1	<5.09	<-1.76	0.0392	0.0392	2	1.2152	0.507
2	[5.09-5.44 [	[-1.76 ; -1 [	0.1587	0.1195	4	3.7045	0.024
3	[5.44-5.79 [	[-1 ; 0.24 [	0.5948	0.4361	5	13.5191	5.368
4	[5.79-6.14 [	[0.24 ; 0.52 [	0.6985	0.1037	10	3.2147	14.322
5	[6.14-6.49 [	[0.52 ; 1.28 [	0.8997	0.2013	8	6.2403	0.496
6	>6.49	>1.28	1	0.1003	2	3.1093	0.396
<b>Total</b>				1	31	$\chi^2_{\text{calculé}}$	<b>21.113</b>

$$ddL = n-m-1 \quad m=3$$

$$ddL = 6-3-1 = 2 \quad \text{et pour probabilité de } 0.05$$

$$\chi^2_{\text{tabulé}} = 5.991$$

Le  $\chi^2_{\text{calculé}}$  étant supérieur au  $\chi^2_{\text{tabulé}}$  ( $\chi^2_{\text{calculé}} > \chi^2_{\text{tabulé}}$ ), l'ajustement à la loi log normale n'est pas acceptable.

### C- Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée

A partir de l'équation d'ajustement, nous pouvons calculer les précipitations pour des périodes de récurrences données.

Partant de l'équation de la loi normal :  $P = 395.3 + 171.89u$

Tableau 31 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.

Type de précipitations	Station Khemis
Précipitations décennales (u=1.28) (mm)	615.32
Précipitations centennales (u=2.33) (mm)	795.8
Précipitations millénaires (u=3.09) (mm)	926.44

### III.4.2- Ajustement des lames d'eau écoulées à la station de Khemis

Tableau 32: Paramètres de position des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i$	45.09
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum (\bar{Q}_i - Q)^2$	1341.43
Ecart type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	36.63
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{Q}$	0.81

Le coefficient de variation  $Cv > 0,5$ , laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi log normale.

#### A- Ajustement des lames d'eau écoulées annuelles à loi log normale

$$\text{Log } Q \text{ (mm)} = \bar{Q} \text{ Log} + \sigma \text{ Log } U$$

Tableau 33 : Paramètres de position pour la loi log normale des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011)

Paramètres	Formules	Valeur
Moyenne	$\bar{Q} \log = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \log Q_i$	3.5
Variance	$\sigma^2 \log = \frac{1}{N} \sum (\log Q_i - \bar{Q} \log)^2$	0.7
Ecart type	$\sigma \log = \sqrt{\sigma^2 \log}$	0.84
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma \log}{\bar{Q} \log}$	0.24

#### ➤ Test graphique

Le test graphique (Figure 29), montre que la distribution log normale s'ajuste bien.

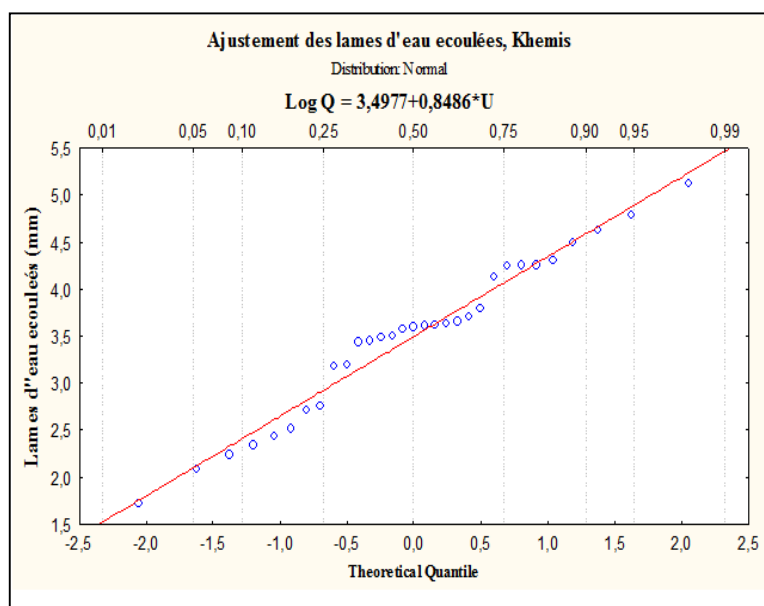


Fig.29: Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi log normale de la Station de Khemis.

➤ Test du  $\chi^2$  :Tableau 34 : Calcul du  $\chi^2$ .

Nombre de classes	Limite de classes	Bornes standardisées	Fréquences cumulés à la borne >	Fréquence simple Théorique	Effectif observé (ni)	Effectif théorique (npi)	(ni-npi) <sup>2</sup> /npi
1	<2.6	<-1.07	0.1432	0.1432	6	4.4392	0.549
2	[2.6-3.11 [	[-1.07; -0.46 [	0.3228	0.1796	2	5.5676	2.286
3	[3.11-3.62 [	[-0.46 ; 0.14 [	0.5557	0.2329	9	7.2199	0.439
4	[3.62-4.13 [	[0.14; 0.75 [	0.7734	0.2177	5	6.7487	0.453
5	[4.13-4.64 [	[0.75 ; 1.36 [	0.91309	0.13969	7	4.33039	1.646
6	>4.64	>1.36	1	0.08691	2	2.69421	0.179
<b>Total</b>				1	31	$\chi^2_{\text{calculé}}$	5.552

Le nombre de degré de liberté = nombre de classe – nombre de paramètre -1  
 ddL = n-m-1 m=3

ddL = 6-3-1 = 2 et pour probabilité de 0.05

$\chi^2_{\text{tabulé}} = 5.991$

Le  $\chi^2_{\text{calculé}}$  étant inférieur au  $\chi^2_{\text{tabulé}}$  ( $\chi^2_{\text{calculé}} < \chi^2_{\text{tabulé}}$ ), l'ajustement permet donc d'admettre une distribution log normale des lames d'eau écoulées.

**B- Calcul des lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée**

A partir de l'équation d'ajustement, nous pouvons calculer les lames d'eau écoulées pour des périodes de récurrences données.

Partant de l'équation de la loi log normal :  $\text{Log } Q \text{ (mm)} = 3.5 + 0.84.u$

Tableau 35 : Calcul des Lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée.

Type des Lames d'eau écoulées	Station Khemis
Lame d'eau écoulée décennale (u=1.28) (mm)	97.05
Lame d'eau écoulée centenaire (u=2.33) (mm)	234.44
Lame d'eau écoulée millénaire (u=3.09) (mm)	443.9

**III.5- Conclusion**

Cette étude nous amène à conclure que le climat de la zone d'étude est caractérisé par :

- ❖ des précipitations moyennes annuelles égales à 395.3 mm, à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).
- ❖ une moyenne annuelle des lames d'eau écoulées égale 45,09 mm à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).
- ❖ Une moyenne annuelle de température égale à 17.6 °C avec Janvier le mois le plus froid et Août le plus chaud.
- ❖ A l'échelle saisonnière, l'étude des précipitations montre que l'Hiver est la saison la plus humide et l'Eté est la plus sèche.
- ❖ Les indices climatiques permettent de préciser qu'il s'agit d'un climat semi-aride à hiver frais.

**CHAPITRE IV**

**MODELISATION PLUIE – DEBIT**



## IV.1- Etat de l'Art de la modélisation

### IV.1.1- Introduction

La résolution des problèmes liés à la gestion des bassins versant notamment l'aménagement des ponts et des barrages, la prévision des inondations nécessite une parfaite connaissance de leurs étiages et leurs crues. Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul pluie-débit, et d'estimation des eaux d'un bassin versant devient nécessaire.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse (satisfaisante) aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle (HENINE, 2005).

Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination, la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc.

Dans ce travail, nous présentons les modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public.

Cet état d'art est reproduit à partir des travaux de magister de R Bouanani, 2010.

### IV.1.2- Modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique.

A quel besoin répondaient et répondent encore ces modèles?

La littérature scientifique présente une très grande diversité de modèles dont très peu ont trouvé une utilisation opérationnelle. La question de l'utilisation de modèles en hydrologie pour effectuer des prévisions, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables-se pose en particulier pour les bassins versants pour lesquels nous disposons de séries de débits mesurés.

Nous pouvons distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

#### ❖ La modélisation comme outil de recherche

La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures (R Bouanani, 2010).

#### ❖ La modélisation comme outil de prévision

Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables dépendantes (débit aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

#### ❖ La modélisation comme outil d'extrapolation

La reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certain cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zone inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies - éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie couplé à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

La modélisation des phénomènes et comportements hydrologiques des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation). Cette modélisation est sensée décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrages, retenues).

#### IV.1.3- Différentes approches de la modélisation

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent dans la figure 30.

Quelques logiciels de modélisation hydrologiques seront présentés dans la section suivante, nous nous contentons de donner ici une simple définition des différentes approches.

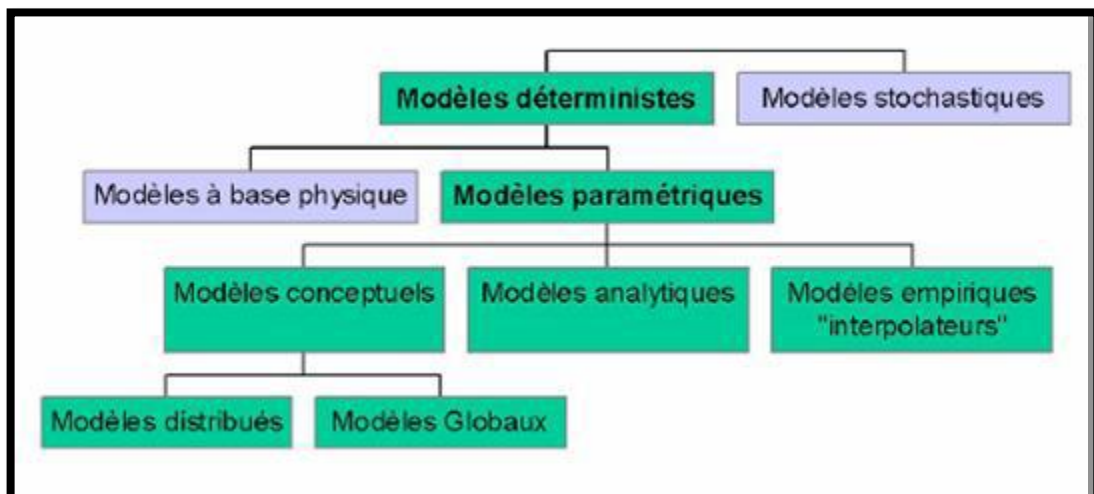


Fig.30 : Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002)

#### A- Modèles stochastiques

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement.

Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions.

Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premier moment (Vauclin, 1991).

### **B- Modèles déterministes**

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variables permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple: le niveau de remplissage des différents « réservoirs» d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols etc.) , une valeur de réalisation unique de variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant) (Maftai, 2002).

### **C- Modèles à base physique**

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme SHE tendent à s'en rapprocher.

### **D- Modèles paramétriques**

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

### **E- Modèles empiriques**

Le type de fonctions reliant les variables est *fixé*, à priori (fonction polynomiale, fonction étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées. (Gaume, 2002).

### **F- Modèles analytiques**

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires: les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables (Gaume 2002).

### **G- Modèles conceptuels**

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié.

Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. A travers ce type de

modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratique agricoles).

Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement.

### **H- Modèles globaux**

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

Un exemple de ce type de modèle est le modèle GR (génie rural) (CEMAGRÂF) que nous allons utiliser dans cette étude. C'est un modèle à réservoirs, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M.

### **I- Modèle Spatialisés**

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologique (aires contributives).

### **J- Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)**

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement Hydro morphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique.

Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale (Maison, 2000).

L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration.

## VI.1.4- Modèle GR

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel, journalier et horaire.

### VI.1.4.1- Objectifs de développement

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voir indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural - GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

### VI.1.4.2- Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours à priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles,
- Évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle,

### VI.1.4.3- Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

#### VI.1.4.3.1- Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue de l'utiliser pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

### VI.1.4.3.2- Description mathématique

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit  $Q_k$  de l'année  $k$  étant proportionnelle à la pluie  $P_k$  de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de  $P_k$ , de la pluie  $P_{k-1}$  de l'année  $k-1$  et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne  $E$ . Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X \cdot E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Eq.1}$$

Avec :  $X$  l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc, 1955, qui donnent l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre  $X$  traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si  $X$  est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si  $X$  est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

### VI.1.4.3.3- Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre  $X$  adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de  $X$  vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 - 3.5].

### VI.1.4.4- Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

#### VI.1.4.4.1- Introduction

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoulf (1994), Makhoulf et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle.

Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique.

Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

**VI.1.4.4.2- Description mathématique**

Un schéma de la structure est donné à la Figure 31  $P_k$  est la pluie mensuelle du mois  $k$  et  $E$  l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes:

**• Production**

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie  $P_s$  de la pluie  $P_k$  va être ajoutée au contenu  $S_k$  dans le réservoir en début de pas de temps:

$$P_s = \frac{X_1 \left[ 1 - \left( \frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right] \cdot \tanh \left[ \frac{P_k}{X_1} \right]}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left[ \frac{P_k}{X_1} \right]} \tag{Eq.2}$$

Le paramètre  $X_1$ , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès,  $P_1$ , est donnée par:

$$P_1 = P - P_s \tag{Eq.3}$$

Et le contenu du réservoir est actualisé:

$$S' = S_k + P_s \tag{Eq.4}$$

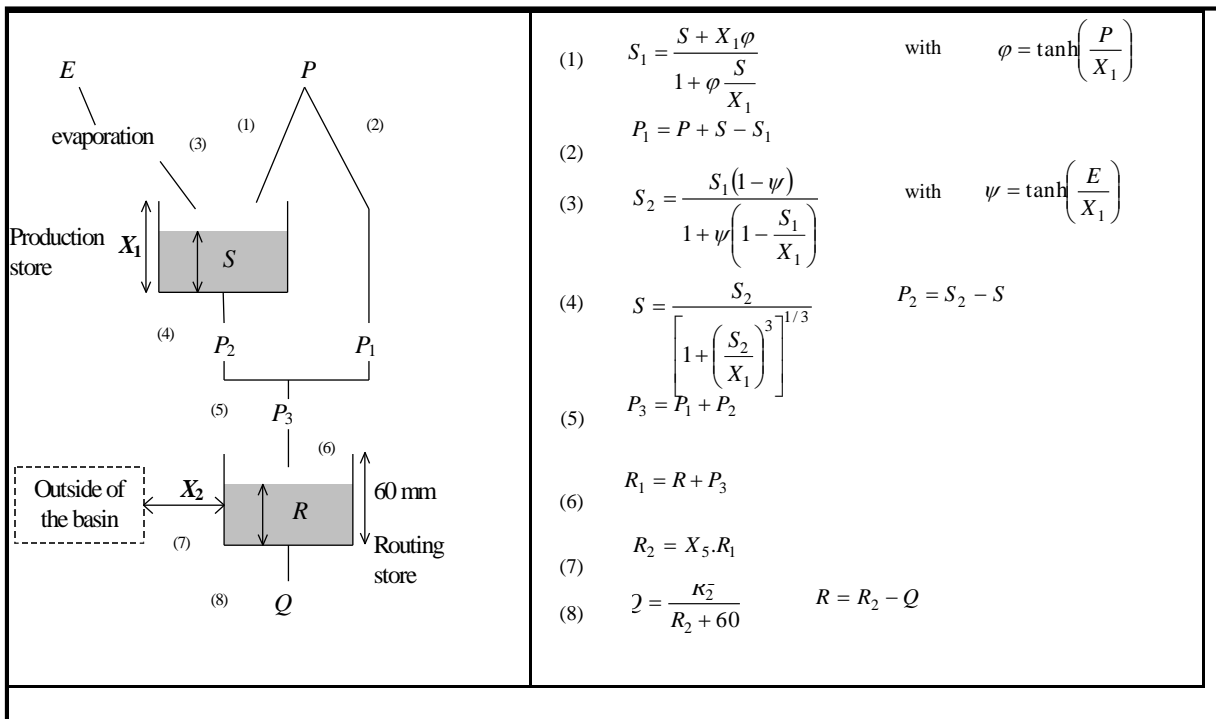


Fig. 31 :Schéma de la structure du modèle GR2M (S.Mouelhi, 2003)

#### VI.1.4.4.3- Paramètres

Le modèle a deux paramètres optimisables:

$X_1$ : Capacité du réservoir de production (mm)

$X_2$ : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, (Perrin, Michel, Andrésian, 2003), on obtient les valeurs données dans le Tableau 36.

Tableau 36 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
$X_1$	380	140-2640
$X_2$	0.92	0.21-1.31

#### VI.1.5- Conclusion

Compte tenu de cette étude des modèles analysés, notre choix s'est porté sur un modèle hydrologique qui traite la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, avec un intérêt particulier sur la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau, il s'agit du modèle hydrologique du Génie Rural (GR). En effet, notre choix de simuler le comportement d'un bassin versant avec le modèle GR, est justifié pour les raisons suivantes:

- Le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides, en plus, ce modèle a la capacité de simuler aussi bien les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain.

- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens nous a encouragés à appliquer ce modèle.

Aussi, dans ce qui suit, nous allons présenter assez exhaustivement le modèle du Génie Rural (GR), que nous appliquerons sur les données du bassin d'Oued Khemis.



## IV.2- Application du Modèles Pluie-Débit au bassin d'Oued Khemis

Avant l'application des modèles du Génie Rural : annuel, mensuel, nous avons essayé le modèle corrélatore simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées.

### IV.2.1- Modélisation de la relation pluie-lame d'eau écoulée par corrélation.

Nous avons soumis nos données annuelles et mensuelles, à un traitement statistique par la méthode des régressions.

- **Régression simple**

Coefficient de corrélation.

- **Corrélation linéaire**

$$Y = bx + a$$

Cette méthode n'est efficace que si le coefficient de corrélation est assez élevé. La représentation simultanée des droites  $Y = f(x)$  dans le repère, met en évidence l'angle  $\theta$  qui correspond à l'angle de régression auquel est liée la validité de la loi linéaire. On appelle le coefficient de corrélation :

$$r = \sqrt{\frac{[\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Tel que : "r" toujours compris entre  $- (1)$  et  $+ (1)$  ainsi :

Si :  $r = +1$  où  $r = -1$ , la relation est dite fonctionnelle,

Si :  $r = 0$ , les variables sont indépendantes.

Un simple changement de variable peut nous conduire à une corrélation non linéaire (multiplicative ou exponentielle). Où :

$$Y = a \cdot x^h$$

$$Y = \exp(bx + a)$$

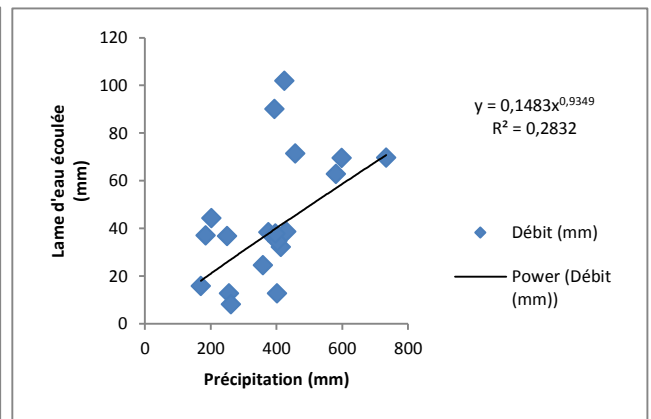
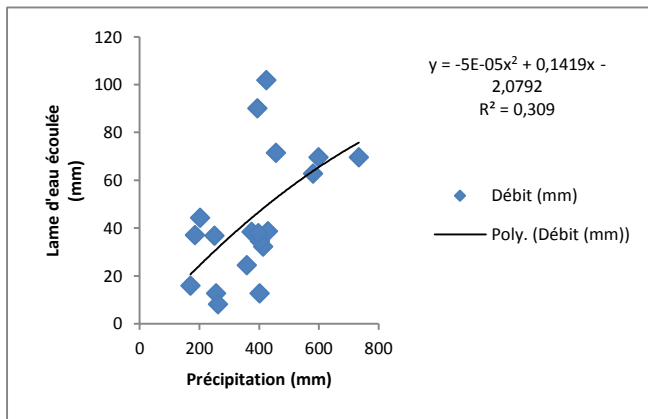
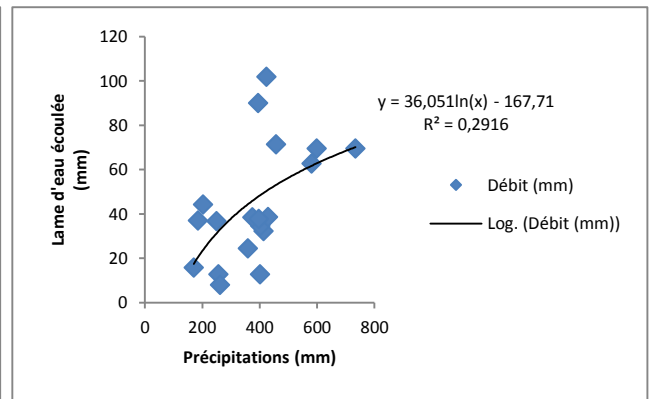
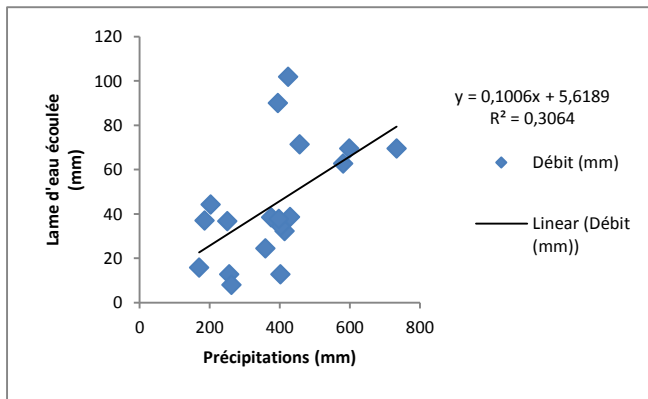
#### IV.2.1.1- Corrélation annuelle

Le tableau 37, montre les différents résultats du coefficient de détermination et les modèles qui relient les paramètres pluies – débits.

Tableau 37: Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulee annuelle (1986-2004)

Type de régression	Station Khemis
Linéaire	$Q=0.1P+5.618$ <b>R<sup>2</sup>=0.306</b>
Logarithmique	$Q=36.05\text{Ln}(P)-167.7$ <b>R<sup>2</sup>=0.291</b>
Polynomiale	$Q=-5E-05P^2+0.141P-2.079$ <b>R<sup>2</sup>=0.309</b>
Puissance	$Q=0.148 P^{0.934}$ <b>R<sup>2</sup>=0.283</b>
Exponentielle	$Q=13.14e^{0.002P}$ <b>R<sup>2</sup>=0.303</b>

P : Précipitations (mm), Q : Débit (mm)



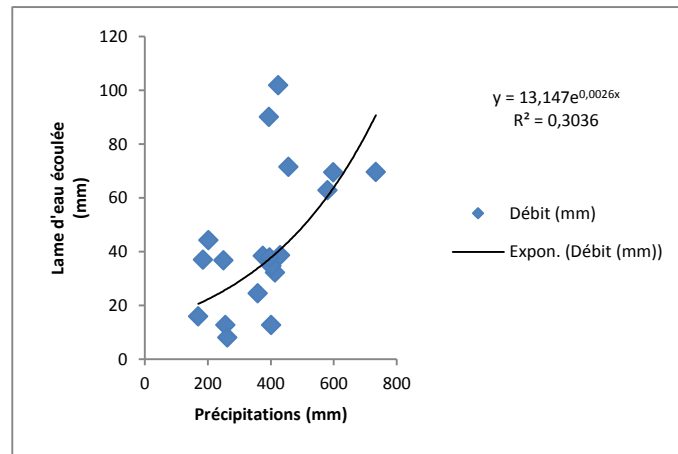


Fig.32: Corrélation Pluie-Débit au pas de temps annuel (1986-2004).

La modélisation par corrélation des données annuelles donne des coefficients de corrélation faibles pour l'ensemble des relations (Figure 32).

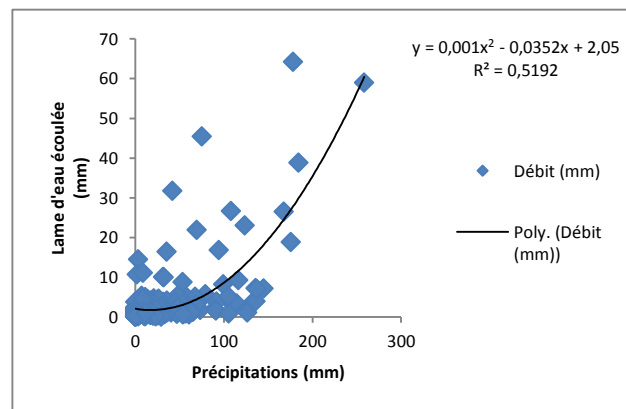
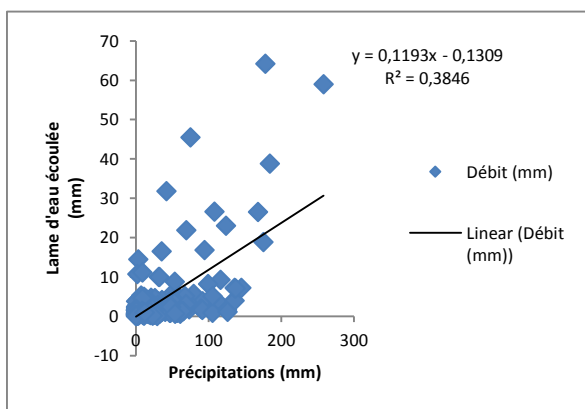
**IV.2.1.2- Corrélation mensuelle**

Nous avons utilisé des séries des données mensuelles de Janvier 1986 à Décembre 2004.

Tableau 38: Résultats des différentes corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée mensuelles.

Type de régression	Station Khemis
<b>Linéaire</b>	$Q=0.199P-0.130$ <b>R<sup>2</sup>=0.384</b>
<b>Polynomiale</b>	$Q=0.001P^2-0.035P+2.05$ <b>R<sup>2</sup>=0.519</b>
<b>Exponentielle</b>	$Q=0.916e^{0.016P}$ <b>R<sup>2</sup>=0.339</b>

P : Précipitations (mm), Q : Débit (mm)



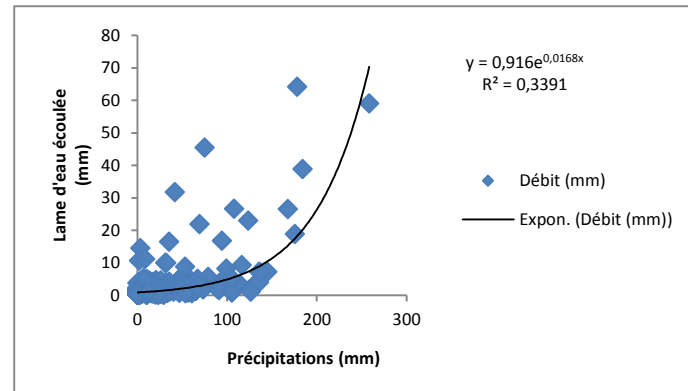


Fig. 33 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps mensuel (1986-2004).

L'examen des tableaux (37 et 38) et les figures (32 et 33), montre que les corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies donnent des coefficients de détermination ( $r$ ) au pas de temps annuel inférieurs à ceux calculés au pas de temps mensuel.

La fonction polynomiale reste tout de même la plus adaptée au pas de temps mensuel avec un coefficient de 0,7.

Ces faibles coefficients de corrélation peuvent s'expliquer par le fait que l'écoulement enregistré dans le mois  $k$  ne correspond pas forcément aux pluies tombées au même mois et que les écoulements de surface peuvent en effet être soutenus par les écoulements souterrains dus aux pluies du mois ou des mois précédents.

Les caractéristiques physiques, la taille, la géologie, et la structure du bassin associées à l'intensité et la répartition spatio-temporelle des précipitations constituent les principaux facteurs qui conditionnent le phénomène.

En effet, ces modèles sont trop simples et ne tiennent pas compte d'autres paramètres qui régissent l'écoulement en particulier les échanges avec l'atmosphère et les réservoirs souterrains.

Aussi et dans la suite du travail, nous proposons d'utiliser un modèle qui prendra compte de ces échanges.

#### IV.2.2- Applications des modèles

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux

#### IV.2.3- Applications d'un modèle global

Les modèles du Génie Rural (GR) du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler), ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle.

Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 Km<sup>2</sup> à plus de 100 000 Km<sup>2</sup>. Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications

opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues et d'étiage, la détection d'impact, la gestion ou dimensionnement d'ouvrage (GHERISSI R, 2012).

L'application de ce modèle a été effectuée sur les données annuelles et mensuelles de la pluviométrie P, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des débits Q (traduits par des lames d'eau écoulées) dans le bassin versant d'Oued Khemis.

#### IV.2.3.1- Modèle annuel GR1A

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée, nous utilisons à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et celle de Thornthwaite en mm et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés au niveau de la station d'Oued Khemis.

##### IV.2.3.1.1-Calage du modèle

Le calage du modèle a été réalisé après le passage par un certain nombre de simulations. Nous avons procédé au calage du paramètre X du modèle, en appliquant des changements sur ce dernier, en commençant par la valeur 0.13 (valeur minimale donnée par le concepteur du GR1A) et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0.01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3.5 jusqu'à l'obtention d'un critère de Nash optimum égale ou supérieur à 70% et un coefficient de corrélation entre les débits simulés et les débits observés plus acceptable. Les résultats du calage sont présentés dans le Tableau 39.

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination  $R^2$  (Tableau 39).

##### IV.2.3.1.2-Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et la méthode Thornthwaite

Tableau 39 :Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A.

Données annuelles	ETP (Turc)				ETP (Thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation ( $R^2$ )	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation ( $R^2$ )
Oued Khemis (1986-1999)	1.01	71.4%	76%	0.777	1.01	76.5%	86.3%	0.79

X: Coefficient de correction de l'ETP (mm) (évapotranspiration potentielle)

\*- Résultats obtenus par le modèle GR1A avec l'ETP de Turc.

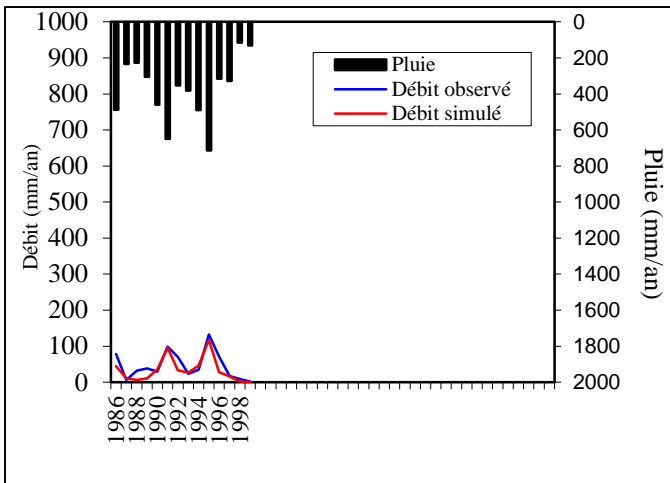


Fig. 34: Visualisation de la qualité du calage

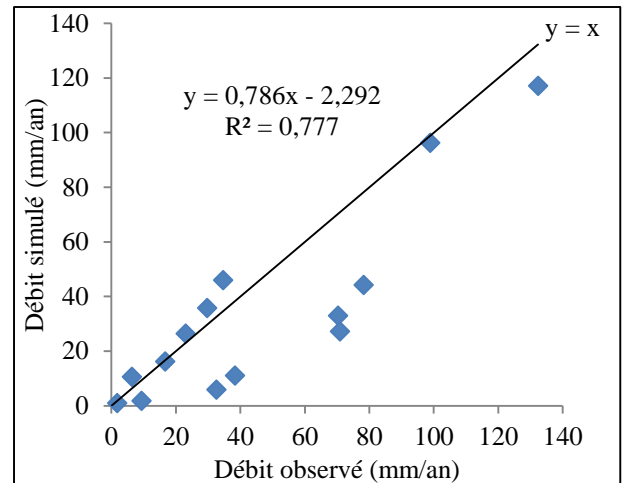


Fig. 35: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

\*- Résultats obtenus par le modèle GR1A avec l'ETP de Thornthwaite.

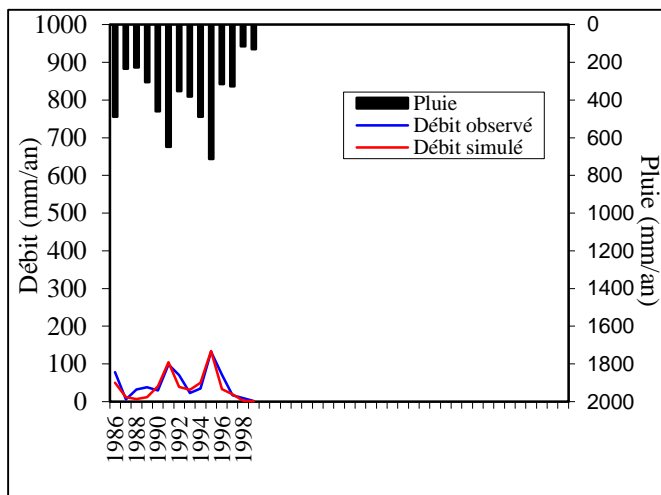


Fig.36: Visualisation de la qualité du calage

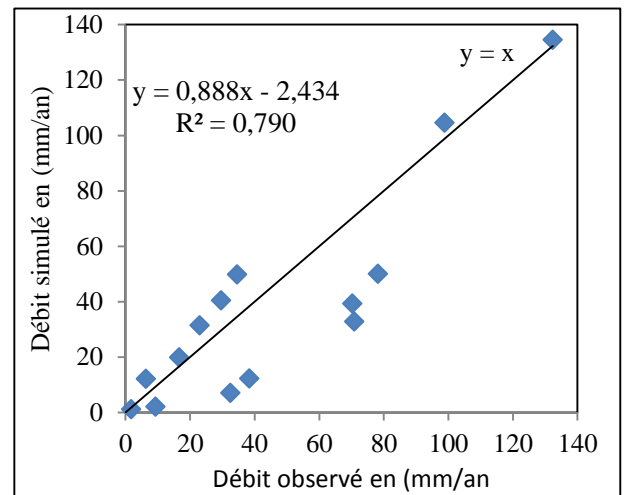


Fig. 37: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

Après les résultats Tableau (38) et la superposition des débits simulés et calculés figure (34, 35, 36 et 37), nous pouvons dire que les modèles sont calés, Toutefois, l'évapotranspiration calculée par la méthode de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Le critère de Nash après calage est compris entre 71.4% et 76.5% Tableau (39). Le bilan est assez équilibré.

Le coefficient de correction de l'évapotranspiration X est supérieur à 1, nous remarquons que. Le paramètre X traduit les échanges avec des nappes profondes, donc le système perd de l'eau en

profondeur tout au long de l'oued Khemis cela paraît évident vu le caractère karstique de la région (voir chapitre Géologie).

#### IV.2.3.1.3-Validation du modèle

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage, elle est relative à la période (2000-2005). Le Tableau 40 et la Figure 38 présente les résultats de cette validation.

Le tableau ci-dessous donne les variations du coefficient de corrélation avec l'utilisation des deux méthodes (Turc, Thornthwaite) pour l'évapotranspiration.

Tableau 40 : Variations de coefficients de corrélation

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R <sup>2</sup> )	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
Oued Khemis	0.795	0.735

Selon ces coefficients de corrélation qui sont obtenus à partir des débits simulés en fonction des débits observés (Tableau 40) et (figure 38), la modélisation pluie-débit élaborée par l'utilisation de GR1A sur les données donne des résultats très acceptables (bien calés).

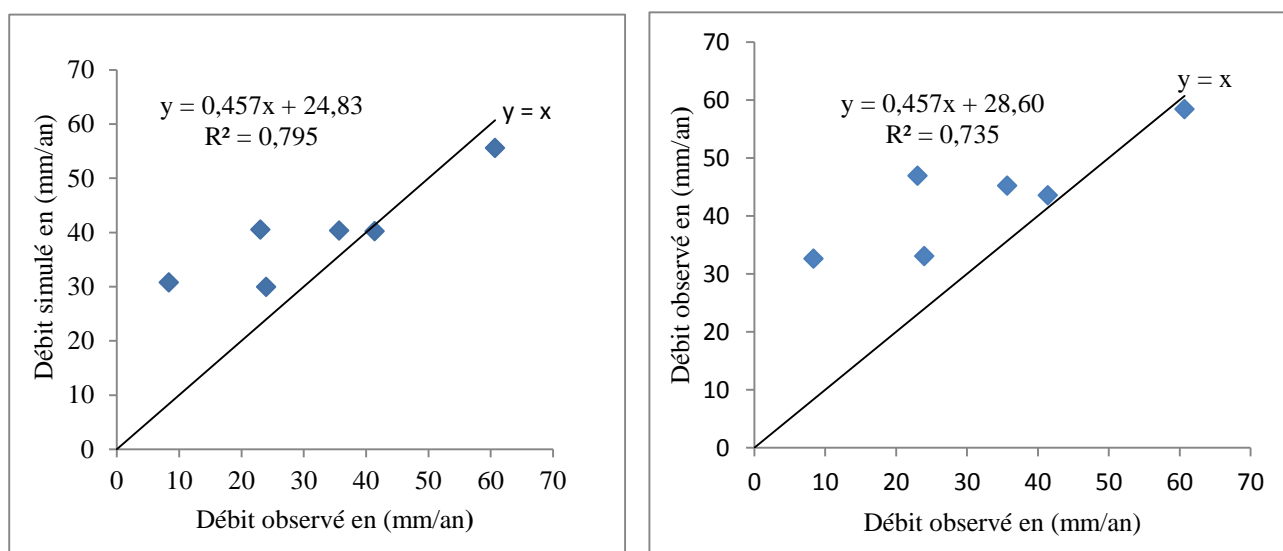


Fig. 38: Validation du modèle GR1A selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite.

### IV.2.3.2-Modèle Mensuel GR2M

Dans cette étude, pour prédire le débit à un mois donné, nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et Thornthwaite (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm).

#### IV.2.3.2.1- Calage du modèle

Le calage des modèles a été réalisé après plusieurs passages sur ordinateur (une centaine de simulations). Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres  $X_1$  et  $X_2$  du modèle entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination et le critère de Nash. Les résultats du calage, coefficient de détermination le critère de Nash sont représentés sur le Tableau 41.

#### IV.2.3.2.2- Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et Thornthwaite

Tableau 41 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M.

Critères		Oued Khemis (1986-1999)
<b>ETP Turc</b>	$X_1$	373.63
	$X_2$	0.87
	Nash%	74.5
	Bilan%	77.6
	$R_0$	30
	$R^2$	0.795
<b>ETP Thornthwaite</b>	$X_1$	384.46
	$X_2$	0.73
	Nash%	76.6
	Bilan%	71.1
	$R_0$	30
	$R^2$	0.827

$X_1$  : Capacité du réservoir de production (mm),

$X_2$  : Paramètre d'échange (mm),

$R_0$  : Niveau de remplissage initial (max: 60mm),

$R^2$  : Coefficient de corrélation.



\* - Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Turc.

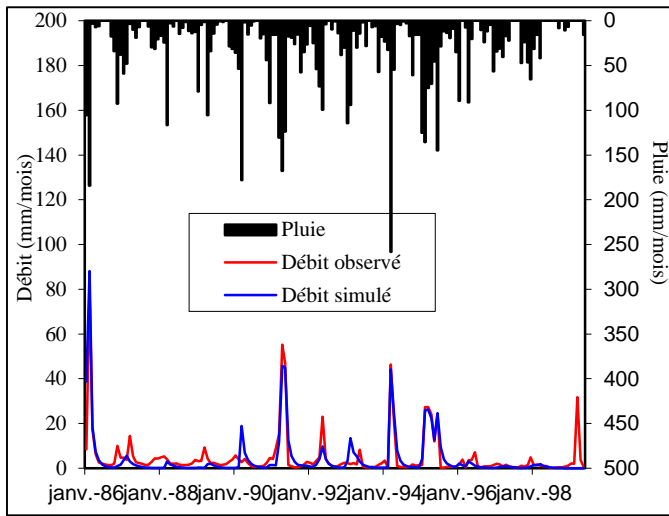


Fig.39: Visualisation de la qualité du calage

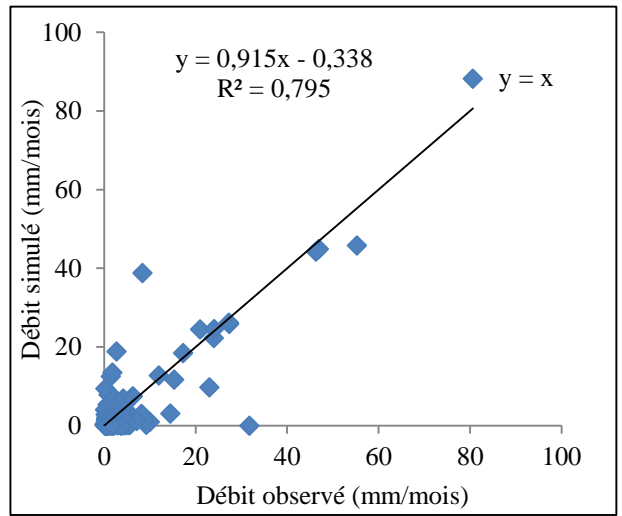


Fig.40: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

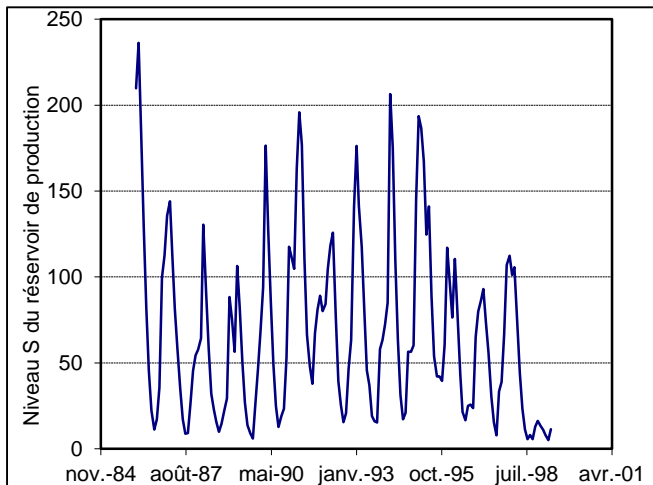


Fig. 41 : Courbe du niveau S du réservoir de production.

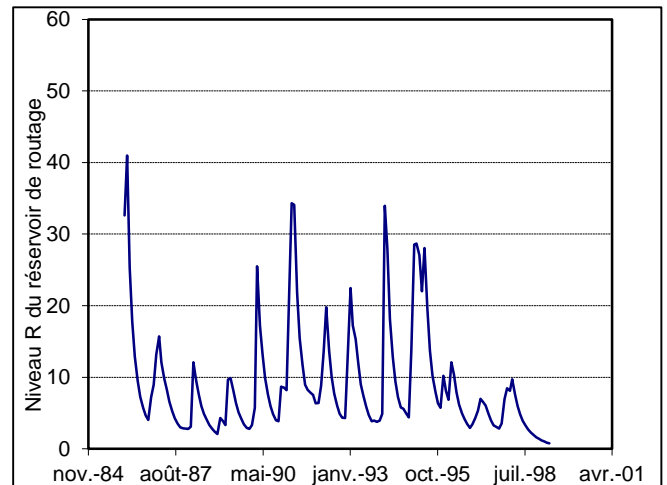


Fig.42 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

\*- Résultats obtenus par le modèle GR2M avec l'ETP de Thornthwaite.

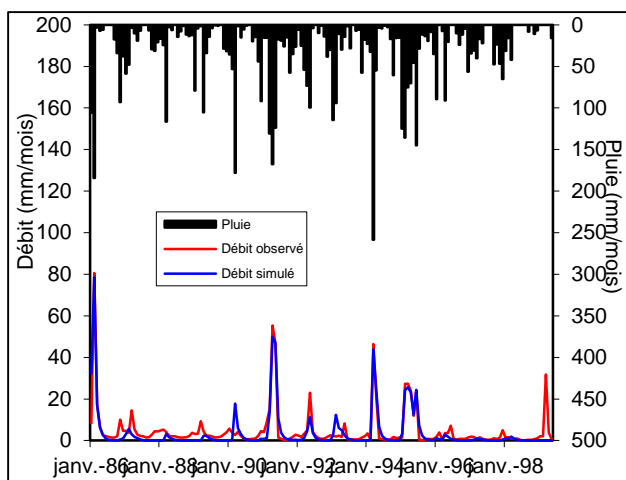


Fig. 43: Visualisation de la qualité du calage

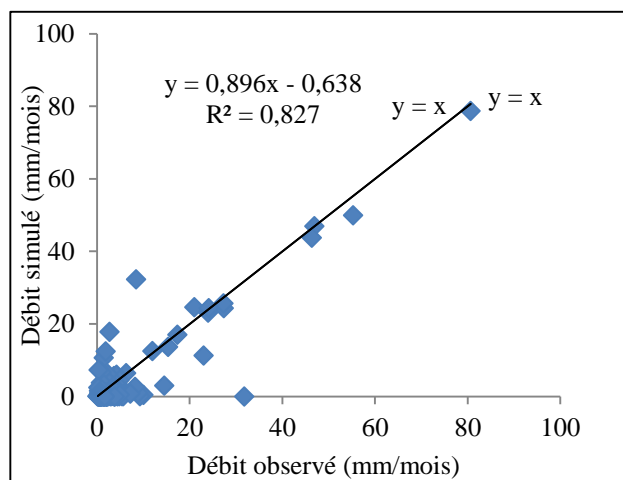


Fig.44: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

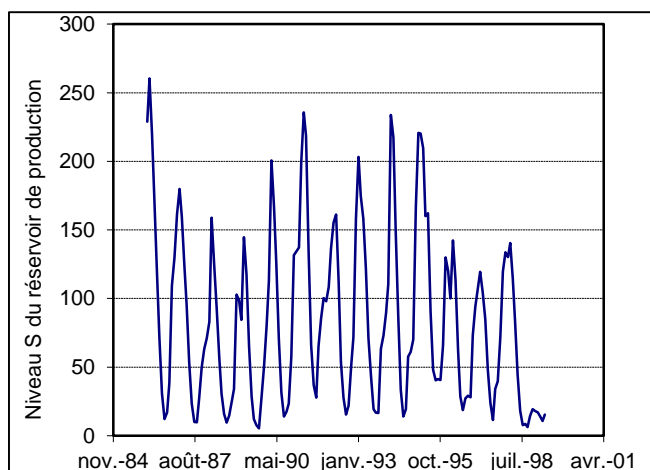


Fig. 45: Courbe du niveau S du réservoir de production.

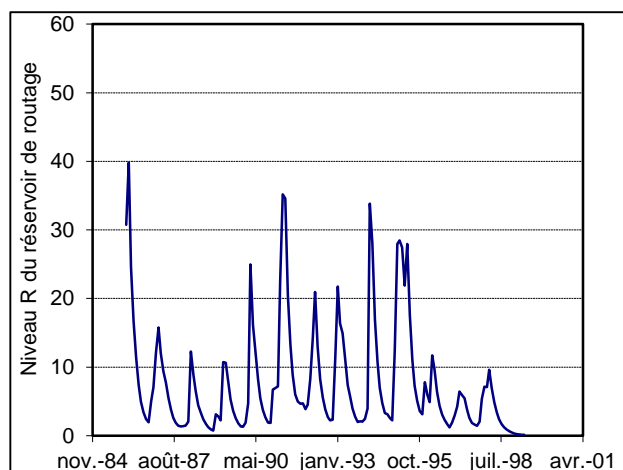


Fig.46 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.

D'après les valeurs du critère de Nash et les coefficients de détermination, ainsi que la bonne superposition des courbes des lames d'eaux écoulées calculés et mesurés (Tableau 41 et les figures 39, 40, 43 et 44), nous pouvons dire que les modèles sont calés. Là aussi, nous remarquons que l'évapotranspiration résultant de la formule de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Selon le graphe de l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production, nous pouvons dire qu'une partie importante reste sous forme d'une perte au niveau du réseau de failles caractérisant le bassin et qui contribue à faire retarder la réponse au niveau des stations hydrométriques.

Ainsi l'évolution du taux de remplissage du réservoir de routage, peut expliquer un échange avec les formations adjacentes.

La variation du réservoir de production varie entre 11.39 mm et 209.76 mm (Fig 41) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.78 mm et 32.61 mm (Fig 42) pour Turc et pour Thornthwaite, la capacité de réservoir de production varie entre 15.33 mm et 228.83 mm (Fig 45) et la capacité du réservoir de routage qui varie entre 0.13 mm et 30.74mm (Fig 46) confirme la réponse des pluies qui est plus lente due aux formations karstiques.

#### IV.2.3.2.3- Validation du modèle

Pour la validation nous avons utilisé de nouvelles données des précipitations et d'évapotranspirations correspondant à la période (Janvier 2000 et Décembre 2004) et qui n'ont pas été utilisées lors du calage.

Le Tableau 42, montre les variations du coefficient de corrélation pour les deux types de données de l'évapotranspiration (Turc et Thornthwaite).

Tableau 42 : Les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation.

Données annuelles	Coefficient de corrélation (R <sup>2</sup> )	
	ETP (Turc)	ETP (Thornthwaite)
Oued Khemis	0.506	0.491

Selon le coefficient de corrélation de la fonction débit observée et débit simulé (Tableau 42) et (Figure 47), la modélisation pluie-débit réalisée par l'utilisation du GR2M donne un résultat faible de l'ordre de 0,7. Cette diminution du coefficient de corrélation lors de cette phase est probablement dû à la qualité des données exprimées par la nature des données utilisées pour la validation qui correspondent soit à des valeurs trop faibles outrop fortes par rapport aux valeurs utilisées lors du calage.

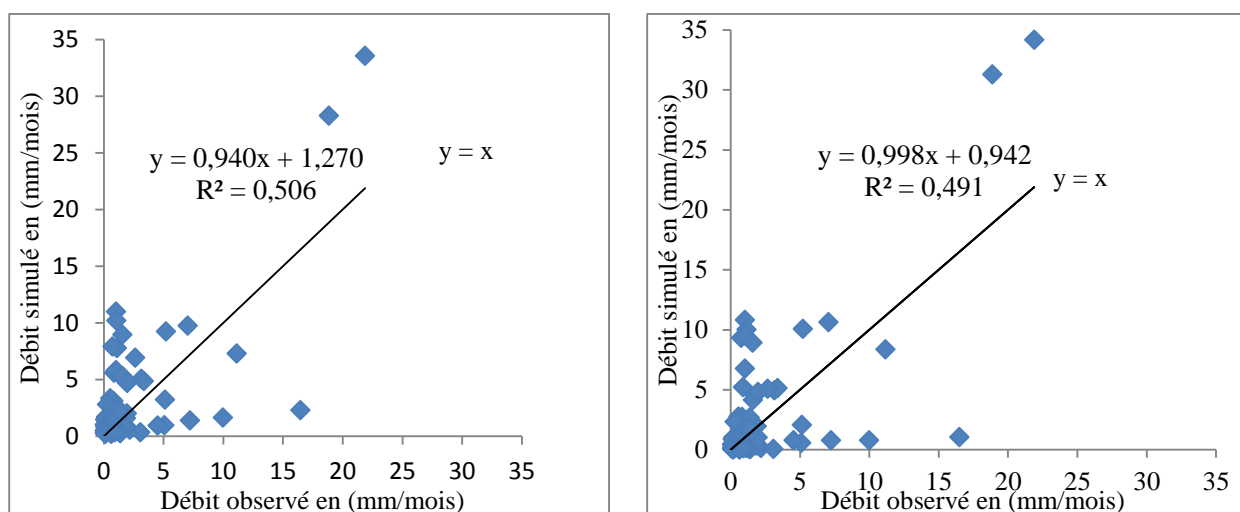


Fig. 47: Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite

### IV.3- Conclusion

Les résultats obtenus par la simulation de la transformation de la pluie en débit par l'utilisation des modèles du Génie Rural GR1A et GR2M pour le bassin du Khemis sont plus satisfaisants que la modélisation par approche corrélatoire qui n'étaient pas concluants. En effet le modèle GR prend en compte la succession chronologique des phénomènes d'une part et l'influence des paramètres aussi bien climatiques (évapotranspiration) que celle physico-hydrogéologiques du bassin versant (humidité du sol et échanges externes). Ainsi, il est apparu que le changement d'échelle de temps a ajouté des gains très importants, non seulement en cohérence de l'ensemble des modèles, mais surtout en performance.

L'application des modèles GR1A et GR2M sur les données du Khemis confirment le phénomène des pertes par infiltration au niveau du bassin.

# **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif général de ce modeste travail était d'effectuer une étude de modélisation hydrologique Pluie-Débit du bassin versant de l'Oued Khemis affluent de la Tafna-NW-algérien.

Nous arrivons à des résultats probants concernant l'écoulement de cet oued.

L'étude morphométrique, nous a permis de caractériser le bassin de l'Oued Khemis avec une forme relativement allongée favorisant une érosion linéaire et régressive avec un chevelu assez dense, son réseau hydrographique est bien organisé.

L'étude géologique et structurale : la région d'étude est située dans la zone de Rharrane, zone géologique importante des monts de Tlemcen. La description lithostratigraphique montre que la série type des monts de Tlemcen affleure dans le bassin étudié (calcaire dolomitique, marne et dolomie).

Les grandes unités structurales sont de direction WSW-ENE. La tectonique de la région est caractérisé par les mouvements de

\* décrochement senestres N10-N30 E

\* décrochement dextres N110 –N145 E

L'étude hydro-climatologique : les données climatiques des stations météorologiques de Khemis et Beni behdel nous ont permis de caractériser notre bassin par un climat semi-aride méditerranéen.

Il ressort de cette étude que le bassin est caractérisé par une saison pluvieuse et un été chaud et sec avec une moyenne de 395.3mm. La série des précipitations suit une loi normale.

Deux saisons sont à distinguer :

\* Saison humide, qui s'étende de Novembre à Mai, avec des pluies irrégulières,

\* Saison sèche, de Juin à Octobre, où la pluviométrie est relativement faible.

La moyenne des températures est de 17.6 °C, le régime thermique est caractérisé par des amplitudes annuelles assez fortes qui permettent d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration.

La valeur de la lame d'eau écoulee mesurée moyenne est de 45.09mm.

La modélisation : Nous avons tenté une modélisation pluie-débit par l'approche corrélatoire, dont les essais de régression effectués entre les précipitations et les lames d'eau écoulées aussi bien mensuelles qu'annuelles. Les résultats obtenus par corrélation simple n'étaient pas concluants, elle semble mal appropriée. Ceci justifiait l'utilisation d'un autre modèle qu'est celui du Génie Rural (GR1A pour le pas de temps annuel et GR2M pour le pas de temps mensuel) de type global.

Ce modèle est basé sur les paramètres d'entrées qui sont les précipitations et l'ETP (calculée par deux méthodes celles de Turc et de Thornthwaite) et le paramètre de sortie est constitué par les lames d'eau écoulées.

Les résultats obtenus par les différentes applications du modèle GR s'avèrent intéressants à savoir :

1- Pour le GR1A, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre  $(Q)=71.4\%$  pour la méthode Turc et  $76.5\%$  pour la méthode Thornthwaite. Le bilan est assez équilibré.

Toutefois, l'évapotranspiration résultant de la formule de Thornthwaite donne de meilleurs résultats que celle de Turc.

Pour le coefficient de corrélation  $R^2$ , il varie entre  $0.777$  pour la méthode de Turc et  $0.79$  pour la méthode de Thornthwaite.

2- Pour le GR2M, les valeurs du critère de Nash obtenues sont bonnes, elles sont comprises entre  $(Q)=74.5\%$  pour la méthode Turc et  $76.6\%$  pour la méthode Thornthwaite. Le bilan est assez équilibré.

Toutefois, l'évapotranspiration résultant de la formule de Thornthwaite donne là aussi un meilleur résultat que celui de Turc.

Le coefficient de corrélation  $R^2$ , varie entre  $0.795$  pour la méthode de Turc et  $0.827$  pour la méthode de Thornthwaite.

La validation du modèle annuel dans lequel nous avons introduit de nouvelles données (n'ayant pas été utilisées pour le calage) a donné de bons résultats confirmant le bon calage de nos modèles sur le bassin et l'excellente performance quant à l'utilisation du modèle GR pour des bassins à climat semi-aride méditerranéen.

Pour le modèle mensuel, les résultats du calage sont bons, par contre, ce n'est pas le cas pour la validation. Ceci peut être dû à la nature des données utilisées pour la validation qui correspondent soit à des valeurs trop faibles ou trop fortes par rapport aux valeurs utilisées lors du calage.

Ce modeste travail représente un essai d'utilisation du modèle GR pour un sous bassin de la Tafna, il serait souhaitable de continuer l'application avec d'autres pas de temps journalier GR4J et même horaire GR4H afin de traiter les événements. Comme, il serait souhaitable d'appliquer d'autres modèles de type distribué ou couplé dans le but d'affiner les résultats.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



**AIDOUNI A., CHERRAT A.** 2008. Etude hydrologique et hydrochimique des eaux thermales de la region de Remchi, Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 78 p.

**ANDREASSIAN V., CHARLES P., CLAUDE M.** 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)-Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.

**BENADDA L.** 2000. Etude d'un projet de mise en valeur par irrigation du périmètre d'El-Fhoul à partir d'Oued Sikkak. Mem .Ing., Univ. Tlemcen, 196 p.

**BENEST M. 1985.** Evolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est Marocaine au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé: Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse, Doctorat, Univ. Lyon. Fasc. 1. 367P.

**BENHADDA N.** 2014. Contribution a l'étude hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Elmalah (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 154p.

**BENHAZIL L.** 2011. Application du modèle GR au bassin versant de l'Oued Isser. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 80p.

**BOUANANI A.** 2004. Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérien). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen, 250 p.

**BOUANANI A., BABA-HAMED K., BOUANANI R.** 2010. Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : Cas du bassin de l'Oued Sikkak (Tafna-NW algérien). 6 p.

**BOUANANI R.** 2010. Modélisation de la fonction pluie-débit. Application au bassin versant de la Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 110 p.

**BOUKHARI K., ER-ROUANE S., GOUZROU A.** 2004. Analyse statistique du régime hydrologique sur la plaine de Mejjate et sa bordure occidentale, (Maroc). Larhyss Journal, n° 03, 14 p.

**BOURBABA L., TORCHI M.** 2014. Application de quelques traitements statistiques aux données physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de la plaine d'Hennaya (NW-Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 98 p.

**BOUREK R.** 2010. Modélisation pluie-débit. Application au bassin versant de la Mactaa (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 118 p.

**ESSADAOUI M.** 2012. Modélisation hydrologique du bassin versant Ouergha par utilisation de la plateforme WMS. Mém. Ing. Univ. Mohammed vagdak, 115 p.

**FANDI O.** 1999. Etude hydrogéologique des sous bassins versants de la Tafna (Isser, Sikkak et Lakhdar). Recherche d'un modèle pluie - débit. Mém. Ing.Univ. Tlemcen, 197 p.

**GADIRI F. 1995.** Esquisse hydrogeologique de la région de Khemis. Mém. D.E.U.A.Inst. Science de la terre. Univ. Tlemcen. 82p.

**GAUME E.** 2002. Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologies. Mém. H.D.R., Ecole National des Ponts et Chaussées. 269 p.

**GHERISSI R.** 2012. Hydrologie et modélisation pluie-débit. Cas du bassin versant de l'Oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 156 p.

**GHERISSI R., BOUANANI A., BABA-HAMED K.** Modélisation pluie-débit à l'aide d'un modèle conceptuel globale. Application au bassin d'Oude Lakhdar (Tafna-NW Algérien). 4 p.

**KHELIFI S.** 2012. Application du modèle hydrologique GR (annule, mensuel et journalier) au bassin versant d'Oued Sikkak (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 136 p.

**LAHMER A., CHENNI F.** 2000. Etude hydrologique des sous bassins versant de la Tafna « Sebdou (Haute Tafna) Mouilah-Boukiou » recherche d'un Modèle Pluies-Débits. (NW-Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 120 p.

**MAFTAI C.P** 2002. Etude concernant les écoulements superficiels, modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumani, 75 p.

**MAISON P.** 2000. Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant. Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée. Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse en Science de la terre et environnement, 303 p.

**MATHEVET T.** 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 p.

**MEDANE K.** 2012. Hydrologie et modélisation pluie-débit. Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud Tafna (NW-Algérien). Mém. Magister, Univ. Tlemcen, 121 p.

**MEKAHLI L.** 1988. Le jurassique inférieur et moyen de la partie occidentale du Horst de Rhar-Roubane, (Tlemcen: Algérie occidentale) Stratigraphie Sédimentologie, cadre dynamique Thèse Magistère. Univ. Oran.255p.

**MICHEL C.** 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre? La Houille Blanche (1), pp. 39-44.

**MIMOUNI D., MAHBOUBI H.** 2014. Etude géologique de l'indice de minéralisation (Djbel Beglen) partie Sud des monts de Ghar-Roubane, Tlemcen, Algérie. Diplôme de Master Académique, Univ. Tlemcen, 67 p.

**MOUELHI S.** 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Cemagref (Antony), France, 323 p.

**MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN C., ANDREASSIAN V.** 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* n°328, pp. 283-296.

**MOUELHI S., MICHEL C., PERRIN, C. ET ANDREASSIAN V.** 2006b - Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology* n° 318(1-4), pp. 200-214.

**PERRIN C.** 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. Cemagref. Antony), 530 p.

**PERRIN C., ANDRÉASSIAN V., MICHEL C.** 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, 16 p.

**RAHMANI S.** 2012. Application du modèle hydrologique GR au bassin versant de la haute Tafna a Beni Bahdel (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 111 p.

**SELADJI S.** 2000. Contribution à l'étude hydrologie du bassin versant de l'Oued Khemis. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 100 p.

**THOMAS G. 1985.** Géodynamique d'un bassin intra-montagneux, le bassin du bas Cheliff occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire, Thèse d'Etat, Univ. Pau, 594 pp.

**ZENNAKI A.** 2010. Application du modèle hydrologique GR au bassin versant d'Oued Mouilah (NW- Algérien). Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 129 p.

# **Annexes**

**ANNEXE I: Données et résultats du modèle GR1A**

Année	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
1986	488	78,19	973,26	44,29	906,32	50,06
1987	234,3	6,3	983,45	10,66	919,3	12,09
1988	227,5	32,5	970,32	5,99	893,15	7,03
1989	304,5	38,31	1001,3	11,14	954,25	12,20
1990	460,3	29,62	975,41	35,88	912,03	40,38
1991	649,1	98,84	952,87	96,34	904,38	104,51
1992	353,6	70,28	940,72	33,02	850,26	39,23
1993	381,4	22,99	939	26,47	853,28	31,38
1994	488,9	34,59	967,07	46,01	923,6	49,79
1995	713,1	132,3	973,07	117,15	887,49	134,53
1996	315,5	70,86	966,65	27,28	868,76	32,80
1997	327,4	16,62	979,94	16,23	879,04	19,82
1998	114,4	9,3	971,74	1,84	903,41	2,12
1999	130	1,78	985,93	1,02	942,96	1,11

<b>Données de validation</b>						
2000	476,3	23,97	990,67	29,91	936,84	33,08
2001	451,3	41,39	1002,58	40,22	956,75	43,61
2002	454,3	23,05	990,73	40,49	909,27	46,93
2003	524,6	60,71	994,88	55,58	965,76	58,43
2004	259,2	35,68	982,1	40,35	929,80	45,23
2005	442	8,34	972,49	30,79	940,76	32,67

**ANNEXE II: Données et résultats du modèle GR2M**

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	Turc		Thornthwaite	
			ETP (mm)	Débit simulé (mm)	ETP (mm)	Débit simulé (mm)
janv-86	105,5	8,4	35,36	38,81	14,35	32,30
févr-86	184,3	80,63	45,37	88,19	22,3	78,65
mars-86	3,2	17,33	57,12	18,47	31,74	16,97
avr-86	7	6,31	86,59	7,46	68,12	6,45
mai-86	6	2,53	106,66	3,52	80,45	2,66
juin-86	0	2,21	121,27	1,78	117,06	1,04
juil-86	0	1,69	138,38	1,01	172,88	0,45
août-86	0	1,42	131,8	0,61	182,28	0,21
sept-86	17,5	1,48	98,29	0,39	108,91	0,10
oct-86	33,8	2,02	69,81	0,29	57,48	0,06
nov-86	92,7	10,03	45,64	0,99	30,28	0,46
déc-86	38	4,69	36,97	1,57	20,47	0,93
janv-87	58,8	4,71	39,57	3,7	19,09	3,08
févr-87	47,8	3,69	41,58	5,57	16,12	5,64
mars-87	3,6	14,48	55,5	3,06	27,56	3,02
avr-87	10,1	5,3	87,48	1,91	69,13	1,75
mai-87	18,9	2,78	109,23	1,32	86,7	1,15
juin-87	7	2,23	125,82	0,81	137,41	0,55
juil-87	0	2,06	137,65	0,5	166,65	0,25
août-87	0	1,48	129,72	0,33	166,12	0,12
sept-87	6,5	1,53	97,46	0,22	102,96	0,06
oct-87	29,5	2,9	74,89	0,16	75,07	0,03
nov-87	31,3	4,48	46,57	0,14	31,23	0,03
déc-87	20,8	4,35	37,98	0,14	21,26	0,03
janv-88	16,7	4,86	40,84	0,14	22,54	0,04
févr-88	24,2	5,36	47,66	0,17	26,59	0,07
mars-88	116,4	4,07	56,32	3,06	30,75	3,16
avr-88	2,7	2,17	82,78	1,77	57,75	1,53
mai-88	6,3	2,07	105,04	1,09	76,33	0,79
juin-88	0	2,12	117,62	0,66	102,74	0,36
juil-88	14,5	1,59	138,01	0,44	171,05	0,20
août-88	7,8	1,39	131,01	0,29	176,91	0,10
sept-88	1,2	1,39	99,26	0,2	114,67	0,05
oct-88	11,5	1,59	73,06	0,14	69,72	0,03
nov-88	13,7	2,15	43,46	0,1	26,09	0,01
déc-88	12,5	3,74	35,26	0,07	18,01	0,01
janv-89	79,1	3,1	36,92	0,34	13,54	0,17
févr-89	4,5	3,26	44,16	0,27	17,38	0,14
mars-89	1,5	9,28	61,35	0,2	35,71	0,09
avr-89	105,4	4,25	79,92	1,86	44,64	2,34
mai-89	33,9	2,29	111,18	1,96	88,88	2,29
juin-89	14,2	2,44	128,82	1,27	150,75	1,16

juil-89	4,1	1,9	140,3	0,76	181,21	0,51
août-89	0,5	1,39	131,33	0,48	174,5	0,23
sept-89	1,2	1,62	98,78	0,31	105,97	0,11
oct-89	0	1,9	75,52	0,21	74,11	0,06
nov-89	28,6	3,04	50,16	0,15	38,09	0,03
déc-89	31,5	3,84	42,86	0,14	29,47	0,03
janv-90	35,5	5,69	33,16	0,19	11,57	0,06
févr-90	53,4	3,81	50	0,61	30,17	0,40
mars-90	177,9	2,72	62,95	18,84	43,62	17,76
avr-90	1,8	4,22	76,27	6,9	41,49	5,96
mai-90	15,3	2,24	106,92	3,76	80,19	3,07
juin-90	5,4	0,98	125,23	1,96	135,18	1,28
juil-90	0,8	0,62	138,01	1,09	169,77	0,54
août-90	0	0,67	128,72	0,66	160,11	0,25
sept-90	19,7	0,8	101,85	0,42	128,75	0,12
oct-90	14,9	0,98	72,2	0,29	64,95	0,06
nov-90	43,9	2,29	46,2	0,27	30,96	0,06
déc-90	91,7	4,6	33,9	1,47	15,27	0,85
janv-91	15,5	4,13	34,83	1,42	14,52	0,90
févr-91	15,5	8,81	38,2	1,3	14,03	0,98
mars-91	130,5	15,32	56,59	11,72	32,08	13,66
avr-91	167,7	55,3	74,46	45,81	40,44	49,96
mai-91	123,6	46,95	102,79	44,92	71,33	46,94
juin-91	17,6	1,47	123,82	12,51	130,73	10,63
juil-91	18,9	0,82	139,79	5,39	183,52	3,75
août-91	25,9	0,4	132,41	2,84	187,8	1,56
sept-91	15,2	0,44	101,19	1,57	126,7	0,67
oct-91	57,5	0,93	68,25	1,32	54,14	0,45
nov-91	35	1,78	45,06	1,18	30,16	0,39
déc-91	26,2	2,85	35,48	1,09	18,93	0,40
janv-92	5,8	2,37	34,28	0,76	15,68	0,27
févr-92	25	1,71	43,66	0,77	22,88	0,37
mars-92	53,9	3,25	52,62	1,52	28,19	1,32
avr-92	73,1	4,86	78,28	3,96	51,54	4,50
mai-92	99,3	23,01	105,86	9,73	84,14	11,26
juin-92	3,9	4,08	112,02	4,1	89,04	3,57
juil-92	0	2,2	134,8	2,01	155,99	1,30
août-92	9,6	1,07	129,23	1,14	167,57	0,57
sept-92	0,8	0,76	99,73	0,68	121,07	0,26
oct-92	14	1,03	68,45	0,44	58,04	0,13
nov-92	38,1	1,81	45,45	0,34	33,62	0,09
déc-92	30,1	2,49	36,34	0,33	22,5	0,09
janv-93	114,3	2,33	34,56	3,48	16,31	2,56
févr-93	94,1	1,87	38,79	13,47	16,75	12,38
mars-93	11	2,36	58,93	6,96	40,23	6,14
avr-93	29,8	1,77	77,14	5,26	49,65	4,96
mai-93	14,2	8,23	102,79	3	76,11	2,58
juin-93	1,6	0,65	120,61	1,58	120,48	1,04

juil-93	28,3	0,5	137,47	1,05	171,41	0,62
août-93	0	0,48	128,04	0,63	160,63	0,28
sept-93	7,1	0,51	93,33	0,41	91,69	0,14
oct-93	5,9	0,63	68,84	0,27	59,78	0,07
nov-93	57,3	1,52	43,46	0,28	29,63	0,08
déc-93	17,8	2,14	35,04	0,25	20,61	0,07
janv-94	23	3,38	33,73	0,28	12,4	0,11
févr-94	32,5	0,4	40,49	0,44	15,57	0,28
mars-94	258,3	46,36	59,42	44,26	36,02	43,73
avr-94	54,6	21	73,85	24,5	37,57	24,57
mai-94	3,6	0,97	109,97	7,84	91,02	6,68
juin-94	4,5	0,63	123,4	3,47	126,61	2,37
juil-94	0,7	0,58	142,62	1,76	203,07	0,93
août-94	2,8	0,38	132,41	1	186,78	0,41
sept-94	17	0,7	95,37	0,62	94,46	0,19
oct-94	60,7	1,7	72,37	0,58	66,18	0,17
nov-94	15,7	1,14	48,18	0,44	36,4	0,11
déc-94	15,5	1,38	35,26	0,35	17,52	0,09
janv-95	125	1,5	34,83	4,21	13,99	3,26
févr-95	135,6	27,36	46,77	25,86	24,96	24,36
mars-95	75	27,3	57,65	26,22	33,17	25,70
avr-95	70,3	24	78,28	22,3	46,96	23,13
mai-95	45,5	11,96	111,65	12,76	98,18	12,54
juin-95	144,8	24,09	121,27	24,59	117,69	24,34
juil-95	28,5	0,32	136,91	9,45	164,13	7,34
août-95	11,8	0,24	128,38	4,06	159,1	2,47
sept-95	13,6	0,53	93,33	2,09	86,63	1,00
oct-95	19,2	0,78	74,07	1,24	73,78	0,47
nov-95	8,7	0,64	49,84	0,76	41,94	0,23
déc-95	35,1	0,86	40,09	0,61	26,96	0,17
janv-96	89,4	1,72	42,84	2,09	27,42	1,16
févr-96	0	3,93	39,65	1,27	15,9	0,65
mars-96	7,4	0,5	64,79	0,89	51,57	0,44
avr-96	91,1	3,62	79,38	3,04	51,1	2,84
mai-96	20,4	3,66	104,76	2,18	77,51	1,88
juin-96	0	7,19	123,4	1,2	129,38	0,76
juil-96	0	0,74	135,58	0,71	157,85	0,34
août-96	10,3	0,49	125,91	0,45	145,78	0,17
sept-96	24	0,89	93,71	0,31	89,89	0,09
oct-96	11,8	0,87	69,62	0,22	58,99	0,05
nov-96	4,7	0,9	47,48	0,15	36,48	0,03
déc-96	56,4	1,39	39,53	0,21	26,89	0,06
janv-97	34,2	1,97	41,79	0,34	23,99	0,15
févr-97	31	1,7	48,32	0,52	27,53	0,32
mars-97	40,3	0,79	61,35	0,92	40,69	0,77
avr-97	16,9	1,61	82,27	0,8	56	0,65
mai-97	22,2	0,81	107,96	0,68	84,79	0,54
juin-97	0	0,53	121,92	0,43	120,19	0,25



juil-97	0	0,42	132,78	0,28	140,7	0,12
août-97	0	0,5	125,91	0,19	143,92	0,06
sept-97	47,3	1,16	98,29	0,16	109,08	0,05
oct-97	23,7	0,72	74,73	0,14	76,22	0,04
nov-97	46,5	1,48	47,65	0,22	35,36	0,07
déc-97	65,3	4,93	36,97	0,91	20,57	0,52
janv-98	31,4	1,29	39,11	1,39	19,37	0,97
févr-98	15,7	1,67	47,66	1,27	26,2	0,95
mars-98	41,9	1,08	59,18	1,88	35,77	1,84
avr-98	0	0,93	77,71	1,09	45,25	0,90
mai-98	0	1,06	102,5	0,66	68,65	0,42
juin-98	0	0,35	124,22	0,42	131	0,20
juil-98	0	0,09	139,26	0,27	178,78	0,10
août-98	0	0,23	130,37	0,18	171,98	0,05
sept-98	8	0,38	99,42	0,13	115,02	0,02
oct-98	0	0,45	71,48	0,09	63,2	0,01
nov-98	10,8	0,69	46,02	0,06	31,17	0,01
déc-98	6,6	1,08	34,81	0,05	17,02	0,00
janv-99	0	2,1	37,66	0,03	15,68	0,00
févr-99	0	2,03	37,3	0,02	11,11	0,00
mars-99	0	31,78	59,67	0,02	34,23	0,00
avr-99	0	3,78	83,52	0,01	55,95	0,00
mai-99	15,7	0,72	114,82	0,01	106,7	0,00
juin-99	0,7	0,58	125,82	0,01	135,93	0,00
juil-99	0	0,33	139,26	0,01	176,17	0,00
août-99	0	0,21	130,7	0,00	171,93	0,00
sept-99	25,1	1,63	98,12	0,00	105,07	0,00
oct-99	19,5	0,86	76,6	0,00	81,77	0,00
nov-99	33,2	1,01	47,65	0,01	32,96	0,00
déc-99	35,8	1,68	34,81	0,05	15,46	0,02

<b>Données de validation</b>						
janv-00	135,8	1,74	35,1	5,01	12,62	4,56
févr-00	67,3	1,02	47,66	11,02	24,2	10,84
mars-00	8,6	0,88	61,82	5,62	38,91	5,25
avr-00	9,2	0,81	81,76	3,11	51,4	2,75
mai-00	15,9	0,76	110,46	1,94	89,37	1,61
juin-00	0	0,52	128,09	1,08	148,99	0,66
juil-00	0	0,25	139,96	0,65	181,05	0,3
août-00	0	0,16	131,33	0,41	176,61	0,14
sept-00	61,8	1,42	98,29	0,37	105,91	0,11
oct-00	105,3	9,98	68,65	1,64	50,95	0,81
nov-00	59,5	5,13	46,39	3,25	29,84	2,08
déc-00	12,9	1,3	41,16	2,36	26,99	1,5
janv-01	0,3	7,23	40,93	1,39	19,03	0,82

févr-01	8,2	5,08	45,13	0,97	18,72	0,61
mars-01	28,2	4,52	66,33	0,95	48,6	0,81
avr-01	137,2	1,12	83,52	7,78	53,35	10,05
mai-01	58,2	0,73	107,96	7,92	77,8	9,34
juin-01	0	0,55	129,17	3,35	153,07	2,79
juil-01	0	0,19	139,61	1,71	176,19	1,05
août-01	26,5	0,1	131,17	1,04	173,3	0,5
sept-01	37,4	1,27	99,1	0,74	107,76	0,28
oct-01	32,2	2,18	78,21	0,58	87,66	0,18
nov-01	105,2	16,47	43,67	2,3	22,55	1,09
déc-01	17,9	1,95	37,78	2,01	18,72	1,05
janv-02	175,5	1,86	40,93	1,6	20,96	1,98
févr-02	69,3	1,36	47,66	1,86	24,74	2,71
mars-02	8,6	1,05	61,35	10,22	38,57	9,54
avr-02	52,9	7,03	79,65	9,77	47,28	10,65
mai-02	18,7	3,15	108,98	5,07	85,24	4,97
juin-02	9,9	0,67	127,9	2,59	148,78	2,02
juil-02	0,3	0,21	137,1	1,38	162,67	0,8
août-02	2,8	1,84	126,81	0,81	146,9	0,36
sept-02	1,1	0,3	97,12	0,5	100,77	0,17
oct-02	27,5	3,08	74,24	0,34	71,78	0,09
nov-02	35,3	1,37	47,83	0,28	34,02	0,07
déc-02	52,4	1,13	41,16	0,46	27,56	0,18
janv-03	44,9	18,85	36,66	28,3	13,59	31,32
févr-03	24,6	21,89	40,77	33,6	13,7	34,2
mars-03	108	11,14	63,39	7,31	41,17	8,38
avr-03	22,5	3,37	81,76	4,87	49,63	5,16
mai-03	64,7	1,02	110,46	5,84	87,18	6,78
juin-03	5,4	0,27	130,23	2,8	160,85	2,37
juil-03	0,9	0,13	142,3	1,48	197,35	0,92
août-03	11	0,12	131,17	0,87	173,96	0,41
sept-03	2,6	0,12	99,58	0,54	111,21	0,19
oct-03	68,6	0,28	73,91	0,53	67,81	0,17
nov-03	45,2	0,87	47,48	0,67	31,21	0,24
déc-03	126,2	2,65	37,17	6,95	18,1	5,11
janv-04	18,7	1,6	39,34	5,29	18,28	4,17
févr-04	63,1	1,57	48,32	8,97	25,72	8,94
mars-04	48,1	5,2	58,67	9,25	32,63	10,09
avr-04	11	1,97	80,19	4,71	48,18	4,83
mai-04	0,3	1,28	101,32	2,28	62,68	1,93
juin-04	3,1	0,55	124,83	1,26	131,22	0,84
juil-04	0	0,19	140,13	0,75	182,73	0,37
août-04	0	0,09	131,64	0,47	179,38	0,17
sept-04	0,7	0,09	100,96	0,3	121,68	0,08
oct-04	20	0,16	77,19	0,21	85,26	0,04
nov-04	46,9	0,62	44,47	0,2	26,02	0,04
déc-04	47,3	0,93	35,04	0,36	16,02	0,14

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des talwegs suivant les ordres et rapports caractéristiques .....	08
Tableau 2 : Répartition de la surface en fonction de l'altitude .....	11
Tableau 3 : Classification du relief selon l'ORSTOM .....	13
Tableau 4 : Classification du relief selon Ds .....	13
Tableau 5 : Caractéristiques physio-géographiques du bassin versant de l'oued khemis .....	14
Tableau 6 : Présentation des stations pluviométriques .....	24
Tableau 7 : Précipitation moyennes annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	24
Tableau 8 : Précipitation moyennes mensuelle à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	25
Tableau 9 : Précipitation saisonnières moyennes de la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	26
Tableau 10 : Températures moyennes annuelles à la station Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	27
Tableau 11: Températures moyennes mensuelles, maximales et minimales à la station Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006) .....	27
Tableau 12 : Valeur l'ETP par la méthode de Turc à la station Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006) .....	29
Tableau 13 : Valeur l'ETP par la méthode de Thornthwaite à la station Beni Bahdel (1986/1987- 2005/2006).....	29
Tableau 14 : Valeurs des précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Khemis (1986/1987-2005/2006) .....	31
Tableau 15 : Indice d'aridité annuel de De Martonne à la station de Khemis .....	31
Tableau 16 : Valeurs des indices d'aridité mensuels de De Martonne à la station de Khemis .....	32
Tableau 17 : Indice de moral à la station de Khemis .....	33
Tableau 18 : Valeurs des indices mensuels de Moral à la station de Khemis .....	33
Tableau 19 : Type de climat selon Moral .....	33
Tableau 20 : Indice d'Emberger de la station de Khemis.....	34
Tableau 21 : Indice de Stewart de la station de Khemis.....	35
Tableau 22 : Indice de Kerner de la station de Khemis.....	35
Tableau 23 : Débits annuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	36
Tableau 24 : Débits moyennes mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	37
Tableau 25 : Lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	37
Tableau 26 : Lames d'eau écoulées moyennes mensuelle à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	38
Tableau 27 : Paramètres de position des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	40
Tableau 28 : Calcul du $\chi^2$ .....	41

Tableau 29 : Paramètres de position pour la loi log normale des précipitations à la station Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	42
Tableau 30 : Calcul du $\chi^2$ .....	42
Tableau 31 : Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée .....	42
Tableau 32 : Paramètres de position des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	43
Tableau 33 : Paramètres de position pour la loi log normale des lames d'eau écoulées à la station Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	43
Tableau 34 : Calcul du $\chi^2$ .....	44
Tableau 35 : Calcul des Lames d'eau écoulées pour une période de récurrence donnée .....	44
Tableau 36 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants .....	53
Tableau 37 : Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle (1986-2004).....	55
Tableau 38 : Résultats des différentes corrélations entre les pluies et la lame d'eau écoulée mensuelles ..	56
Tableau 39 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR1A .....	58
Tableau 40 : Variations de coefficients de corrélation .....	60
Tableau 41 : Représentation des résultats obtenus par l'utilisation de GR2M .....	61
Tableau 42 : Les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation... ..	64

## Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (Bouanani.A, 2004) .....	04
Figure 2 : Situation du bassin de l'Oued Khemis .....	05
Figure 3 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued Khemis .....	06
Figure 4 : Réseau hydrographique du bassin versant de Khemis .....	07
Figure 5 : Rapport des confluences .....	09
Figure 6 : Rapport de longueur .....	09
Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Khemis .....	11
Figure 8 : Histogramme des fréquences altimétrique du bassin d'Oued Khemis .....	12
Figure 9 : Profil en long de l'Oued Khemis .....	14
Figure 10 : Unité géographique des montes de Rhar-Roubane (D'après G Lucas, 1942) .....	16
Figure 11 : Situation des zones principales de la région de Rhar-Roubane (D'après G.Lucas, 1952).....	17
Figure 12 : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah 1999).....	19
Figure 13 : Carte structurale de l'Oranie nord –occidentale (Thomas, 1985).....	22
Figure 14 : Variation des précipitations annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	25
Figure 15 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	25
Figure 16 : Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	26
Figure 17 : Variation des températures annuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006) ....	27
Figure 18 : Variation des températures mensuelles à la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).	28
Figure 19 : Variation des ETP Turc et Thornthwaite pour la station de Beni Bahdel (1986/1987-2005/2006).....	30
Figure 20 : Diagramme pluviothermique à station de Khemis.....	31
Figure 21 : Abaque de De Martonne .....	32
Figure 22 : Climagramme de l'Emberger .....	34
Figure 23 : Variation des débits annuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	36
Figure 24 : Histogramme des débits mensuels à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	37
Figure 25 : Variation des lames d'eau écoulées annuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011) .....	38
Figure 26 : Histogramme des lames d'eau écoulées mensuelles à la station de Khemis (1980/1981-2010/2011).....	38

Figure 27 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale .....	40
Figure 28 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi log normale .....	41
Figure 29 : Ajustement graphique des lames d'eau écoulées annuelles à la loi log normale .....	43
Figure 30 : Différentes approches de la modélisation (Gaume, 2002) .....	47
Figure 31 : Schéma de la structure du modèle GR2M (S.Mouelhi, 2003) .....	52
Figure 32 : Corrélation Pluie-Débit annuel (1986-2004) .....	56
Figure 33 : Corrélation Pluie-Débit mensuel (1986-2004).....	57
Figure 34 : Visualisation de la qualité du calage .....	59
Figure 35 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés .....	59
Figure 36 : Visualisation de la qualité du calage .....	59
Figure 37 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés .....	59
Figure 38 : Validation du modèle GR1A selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite .....	60
Figure 39 : Visualisation de la qualité du calage .....	62
Figure 40 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés .....	62
Figure 41 : Courbe du niveau S du réservoir de production .....	62
Figure 42 : Courbe du niveau R du réservoir de routage .....	62
Figure 43 : Visualisation de la qualité du calage .....	63
Figure 44 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés .....	63
Figure 45 : Courbe du niveau S du réservoir de production .....	63
Figure 46 : Courbe du niveau R du réservoir de routage.....	63
Figure 47 : Validation du modèle GR2M selon l'ETP respectivement de Turc et Thornthwaite .....	64

## الملخص

لاشك أن هذه الدراسة جاءت لتلقي الضوء على جانب مهم مرتبط بظاهرة بيئية غاية في الأهمية وهي دراسة العلاقة التي تربط بين التساقط والجريان في الأودية خاصة في مجال الاستعمالات المتعلقة بالتهيئة الهيدروليكية والحماية ضد الفيضانات وكذلك في تسيير الموارد المائية ، وبغرض معرفة وفهم أوضح لهيدرولوجيا الحوض المائي قمنا بتطبيق نموذج هذا التساقط وجريان مياه التدفق وهو النموذج الشامل للخران أو نموذج الهندسة الريفية على حوض واد خميس (شمال غرب تافنة-الجزائر)، مستعملين في البداية العلاقات الرياضية البسيطة وبعد أن رأينا عجز تلك العلاقات -ذلك لأنها لا تستعمل كل المعطيات التي تؤثر في ظاهرة الجريان -ارتأينا أن نركز على تطبيق نموذج الهندسة الريفية وبالإضافة إلى عامل التساقط والتدفق أدخلنا عامل التبخر كأحد المعطيات ملتزمين في ذلك حسابات على المدى السنوي والشهري .

بعد هذا الضبط المتحصل عليه من خلال هذه الدراسة قمنا بإثبات صحة هذه النتائج بهدف تحصيل نموذج فعال تحققنا بعدها إلى نجاعة تلك النتائج التي كانت مرضية إلى حد بعيد .

**الكلمات المفتاحية:** خميس - تافنة - الهيدرولوجيا - نموذج - نموذج GR - ارتباط - ضبط - التحقق

## Résumé

Cette étude est sans doute venue pour mettre en exergue un point très important d'un phénomène naturel particulier, c'est l'étude de la relation entre la retombée de la pluie et le débit d'écoulement dans les oueds, très spécialement l'utilisation dans l'aménagement hydraulique et la protection contre les inondations, mais aussi la gestion des ressources hydriques.

Dans le but d'une meilleure compréhension de l'hydrologie d'un bassin, nous avons appliqué la modélisation pluie-débit, qui est un modèle global à réservoir ou modèle du génie rural (GR) sur le bassin d'Oued Khemis (Tafna-NW Algérien) soumis à un climat semi-aride. Nous avons tenté une modélisation pluie-lame d'eau écoulée par l'approche corrélatoire, toutefois les résultats obtenus n'étaient pas concluants par ce que elles ne prennent pas en considération toutes les données qui affectent le débit. De ce fait, nous avons choisi de procéder à l'application du modèle du génie rural, où, nous avons introduit en plus des facteurs pluie et débit, le facteur de l'évapotranspiration, au pas de temps annuel et mensuel. Les résultats obtenus sont plus satisfaisants avec des coefficients de détermination plus importants.

**Mots clés :** Khemis – Tafna – Hydrologie – Modèle – Modèle GR – Corrélation - Calage - Validation

## Abstract

There is no doubt that this work is coming to highlight some sides of an important natural phenomena, it's the studying of the relationship between rainfall and the runoff in the streams, especially their use in the hydraulic arrangement and protection against floods, but also management of the aquatic resources

In the purpose of a better understanding of the hydrological basin, we applied the modeling rain-flow, global model for reservoir or model of rural engineering to the basin of Oued Khemis (Tafna - NW which is Algeria) characterized by semi arid climat. We tried a rainfall-depth of runoff modeling by correlation approach, however, the results were inconclusive.- they don't take in consideration all factors that may influence the flow- these justify the choice of rural engineering, and in addition to rain fall and runoff we introduced the factor of evapotranspiration, annual and monthly measurements were taken.

At the end we were able to prove the veracity of our results which were very satisfactory and can be considered as a step forward to acquire an efficient model.

**Key words:** Khemis – Tafna – Hydrology – Model – Model GR – Correlation – Timing – Validation